

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – ENS  
Trabalho de Conclusão de Curso – TCC

**BALANÇO HÍDRICO NA BACIA DO RIO URUBICI, EM SANTA  
CATARINA, E A SUA RELAÇÃO COM A ZONA DE RECARGA DO  
AQUÍFERO GUARANI**

**Marcus Vinícius Henrique Arantes**

Orientador

Prof. Daniel J. da Silva, Dr.

Co-orientador

Eng. Celso M. Ferreira, Msc

Florianópolis (SC)

Fevereiro de 2008.

**“BALANÇO HÍDRICO NA BACIA DO RIO URUBICI, EM SANTA CATARINA, E A SUA RELAÇÃO COM A ZONA DE RECARGA DO AQUÍFERO GUARANI”**

**Marcus V. H. Arantes**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Centro Tecnológico, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Banca Examinadora:



Janaína S. M. Santos, Msc  
(Doutoranda – PPGEA)



Eng. Celso M. Ferreira, Msc  
(co-orientador)



Prof. Daniel J. da Silva, Dr  
(orientador)

**FLORIANÓPOLIS – SC**

2007-2

**FLORIANÓPOLIS – SC**

2007-2

*Dedico este trabalho a minha família,  
pela dedicação, incentivo  
e compreensão.*

*Agradeço*  
*Todas as dicas e conselhos sábies dados*  
*Pelo meu orientador, Prof. Daniel*  
*e também, pelo meu co-orientador, Celso Moller,*  
*que tanto colaboraram na realização desse trabalho*

## RESUMO

Neste trabalho foram realizados estudos de caracterização hidrológica e balanço hídrico na bacia do rio Urubici, localizada no município de Urubici em Santa Catarina, para a produção de conhecimento sobre a relação entre a hidrologia da bacia e a zona de recarga do Aquífero Guarani que auxiliem na gestão dos recursos hídricos da bacia e/ou como base de informação para futuros trabalhos que venham a ser desenvolvidos na região, os quais necessitem do conhecimento aqui produzido. Foram utilizados para tal, mapas planialtimétrico e hidrográfico, modelos topográficos digitais de elevação, software de geoprocessamento, históricos de precipitação e vazão de estações pluviométricas e fluviométricas da região em estudo, além de uma pesquisa bibliográfica sobre o assunto. A partir deste estudo foi possível identificar um balanço hídrico positivo, o que indica que a bacia do rio Urubici contribui, em média, para a recarga potencia do Aquífero Guarani.

**Palavras-Chave:** Bacia Hidrográfica, Balanço Hídrico, Aquífero Guarani, Zona de Recarga, Urubici.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
2.1. Objetivo Geral .....	10
2.2. Objetivos Específicos .....	10
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
3.1. Aquíferos .....	11
3.2. O Sistema Aquífero Guarani – SAG .....	16
3.3. Balanço Hídrico.....	20
<b>4. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>23</b>
<b>5. METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
5.1. Criação do Banco de Dados e Seleção de Ferramentas de Trabalho.....	29
5.2. Caracterização Fisiográfica da Bacia .....	30
5.3. Identificação da Rede de Monitoramento na Bacia.....	33
5.4. Balanço Hídrico – Método Utilizado.....	35
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>52</b>
6.1. Caracterização Fisiográfica .....	52
6.2. Quantificação das Variáveis do Balanço Hídrico.....	58
6.3. Estimativa da Recarga Potencial Média, Anual e Mensal, na Bacia do Rio Urubici.....	64
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>8. RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>67</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Aquíferos transfronteiriços. ....	12
<b>Figura 2</b> – Tipos de Aquífero quanto à porosidade. ....	13
<b>Figura 3</b> – Tipos de Aquífero quanto à pressão. ....	15
<b>Figura 4</b> – Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani. ....	18
<b>Figura 5</b> – Corte transversal do Sistema Aquífero Guarani. ....	19
<b>Figura 6</b> – Mapa de localização da área de estudo. ....	24
<b>Figura 7</b> – Zona de Recarga do Aquífero Guarani, na Bacia do Rio Urubici. ....	26
<b>Figura 8</b> – Vista do divisor de água e de parte da bacia. ....	27
<b>Figura 9</b> – Corte no divisor de água para passagem de estrada, arenito Botucatu exposto. ....	27
<b>Figura 10</b> – Detalhe do arenito Botucatu. ....	27
<b>Figura 11</b> – Rio Urubici. ....	28
<b>Figura 12</b> – Rio Urubici e o seu leito formado pelo arenito Botucatu. ....	28
<b>Figura 13</b> – Rede de Monitoramento na bacia de Urubici e proximidades. ....	34
<b>Figura 14</b> - Variáveis do ciclo hidrológico para o balanço hídrico. ....	35
<b>Figura 15</b> – Imagem de Satélite usada na obtenção das coordenadas da seção de interesse, no caso a Foz do Rio Urubici. ....	37
<b>Figura 16</b> – Imagem de Satélite georreferenciada no software Arcgis, para delimitação da bacia hidrográfica que contribui na seção de interesse. ....	38
<b>Figura 17</b> – Posição da bacia de Urubici em relação às isoietas (mm) do Estado de Santa Catarina. ....	40
<b>Figura 18</b> – Regiões Homogêneas do Estado de Santa Catarina. ....	42
<b>Figura 19</b> – Estações Pluviométricas selecionadas para obtenção das séries históricas. ....	45
<b>Figura 20</b> – Diagrama dos períodos de disponibilidade dos dados de precipitação média mensal. ....	46
<b>Figura 21</b> – Mapa Altimétrico da bacia do rio Urubici. ....	53
<b>Figura 22</b> – Distribuição gráfica da predominância de alguns intervalos de altitude. ..	54
<b>Figura 23</b> – Ilustração da declividade da bacia. ....	55
<b>Figura 24</b> – Rede de Drenagem Gerada. ....	56
<b>Figura 25</b> – Classificação dos rios segundo Strahler. ....	57
<b>Figura 26</b> – Visualização da bacia em 3D. ....	58
<b>Figura 27</b> - Polígonos de Thiessen, traçado pelos postos de monitoramento da região. ....	59
<b>Figura 28</b> – Precipitação Média mensal na Bacia. ....	60
<b>Figura 29</b> – Evapotranspiração. ....	62
<b>Figura 30</b> – Vazão média mensal da Bacia. ....	63
<b>Figura 31</b> – Recarga potencial mensal do Aquífero Guarani na bacia do rio Urubici ..	66

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Estruturação do Banco de Dados.....	29
<b>Tabela 2</b> - Inventário das estações pluviométricas na bacia do rio Urubici e áreas adjacentes de relevância ao estudo. ....	46
<b>Tabela 3</b> – Quantificação do período de tempo utilizado no estudo e precipitação média anual, por estação de monitoramento. ....	47
<b>Tabela 4</b> - Coeficiente de determinação parcial e total e valores dos coeficientes das equações de regressão da estimativa da evapotranspiração de referência mensal e anual em função da altitude, latitude e longitude no Estado de Santa Catarina.....	50
<b>Tabela 5</b> - Latitude, longitude e Altitude do município de Urubici. ....	50
<b>Tabela 6</b> – Resumo da Caracterização Fisiográfica.....	52
<b>Tabela 7</b> - A Estimativa da Precipitação Média Anual e Mensal de Longo Período, pelos métodos 1 e 2. ....	60
<b>Tabela 8</b> - A Estimativa da Evapotranspiração Média Anual de Longo Período, pelos métodos 1 e 2.....	61
<b>Tabela 9</b> - A Estimativa das Vazões Médias Anual e Mensal de ..... Longo Período, pelos métodos 1 e 2.....	63 63
<b>Tabela 10</b> – Resumo dos volumes obtidos para as variáveis hidrológicas, pelo método 1 ..... .....	64 64
<b>Tabela 11</b> – Resumo dos volumes obtidos para as variáveis hidrológicas, pelo método 2. ....	65



## LISTA DE SIGLAS E FIGURAS

A – área da bacia.

AD – área de drenagem da bacia.

alt – altitude.

ANA – Agência Nacional das Águas.

Dd – densidade de drenagem.

EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agrícola e Extensão Rural de Santa Catarina.

ETI – evapotranspiração real.

ETo - evapotranspiração de referência.

ETP – evapotranspiração potencial.

Fc – comprimento médio dos dias.

I – infiltração.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

Kc – coeficiente de compacidade.

Kf – fator de forma da bacia.

Km – quilômetro.

Km<sup>2</sup> – quilômetro quadrado.

Km<sup>3</sup> – quilômetro cúbico.

Km<sup>3</sup>/ano – quilômetro cúbico por ano.

L - distância seguida entre o curso d'água mais longo desde o exutório até a cabeceira.

L<sub>med</sub> – largura média da bacia;

lon – longitude.

m – metro.

mm – milímetro.

m<sup>3</sup>/s – metro cúbico por segundo.

P - Precipitação média.

$\bar{P}$  - precipitação média da bacia.

P – perímetro da bacia.

Q – vazão.

QMLT – Vazão Média Anual de Longo Termo.

SAG – Sistema Aquífero Guarani.

$t$  – temperatura média mensal.

TIN - Triangulate Irregular Network.

$V_E$  - o volume médio evapotranspirado.

$V_P$  - volume médio precipitado.

$V_Q$  - volume médio escoado.

$\sum L$  - soma dos comprimentos dos rios.

$^{\circ}\text{C}$  – graus Celsius.

$\leq$  - menor ou igual.

## 1. INTRODUÇÃO

O Aquífero Guarani é um reservatório de água subterrânea composto de um conjunto de rochas arenosas localizadas por baixo do nível do terreno com água em seus poros e fendas. Estas rochas depositaram-se há aproximadamente 245 e 144 milhões de anos, (SG-GUARANI, 2007).

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é estratégico no desenvolvimento econômico da região onde ele está inserido, por oferecer água de boa qualidade para os consumos doméstico, industrial e irrigação com custos menores de transporte e tratamento, principalmente, já que se pode utilizar a água, através de poços, em pontos afastados e para qualquer fim, sem a necessidade de grandes investimentos em redes e estações de tratamento que, por vezes, inviabilizam empreendimentos. Porém há a necessidade de se promover estudos hidrológicos nas bacias hidrográficas onde o SAG ocorre para obtenção de conhecimentos, fundamentais para realização da gestão integrada da gota d'água, (REBOUÇAS E AMORE, 2002).

Existem esforços nacionais e internacionais, como o “Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani” que envolvem os quatro países onde há ocorrência do SAG, Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai, contando com o apoio da Organização dos Estados Americanos e o financiamento do GEF (Fundo Mundial para o Meio Ambiente), (SG-GUARANI, 2007).

A bacia do rio Urubici é uma dessas áreas onde ocorre SAG, ela está inserida na zona de recarga direta do aquífero e segundo CALLADO (2003), há 42 anos existem conflitos tanto na bacia, como no município de Urubici, relativos ao uso e ocupação do território, a agricultura baseada no cultivo de hortaliças e utilização de insumos químicos na cultura, desmatamentos para plantio de árvores de crescimento rápido como o *Pinus eliotti*, a ocupação da mata ciliar pela atividade agropecuária, a carência nos serviços de saneamento básico e também o rápido crescimento da atividade turística.

Esses relatos de Callado (2003), somado aos esforços nacionais e internacionais, motivaram a realização desse estudo para a produção de informações sobre a hidrologia da bacia e a sua relação com a recarga do aquífero, de tal modo que elas possam servir para empoderar a comunidade com conhecimentos que auxiliem na implementação e gestão local de projetos que visem à proteção e/ou o uso sustentável do SAG.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Realizar a estimativa da recarga potencial média, anual e mensal, na bacia do Rio Urubici.

### **2.2. Objetivos Específicos**

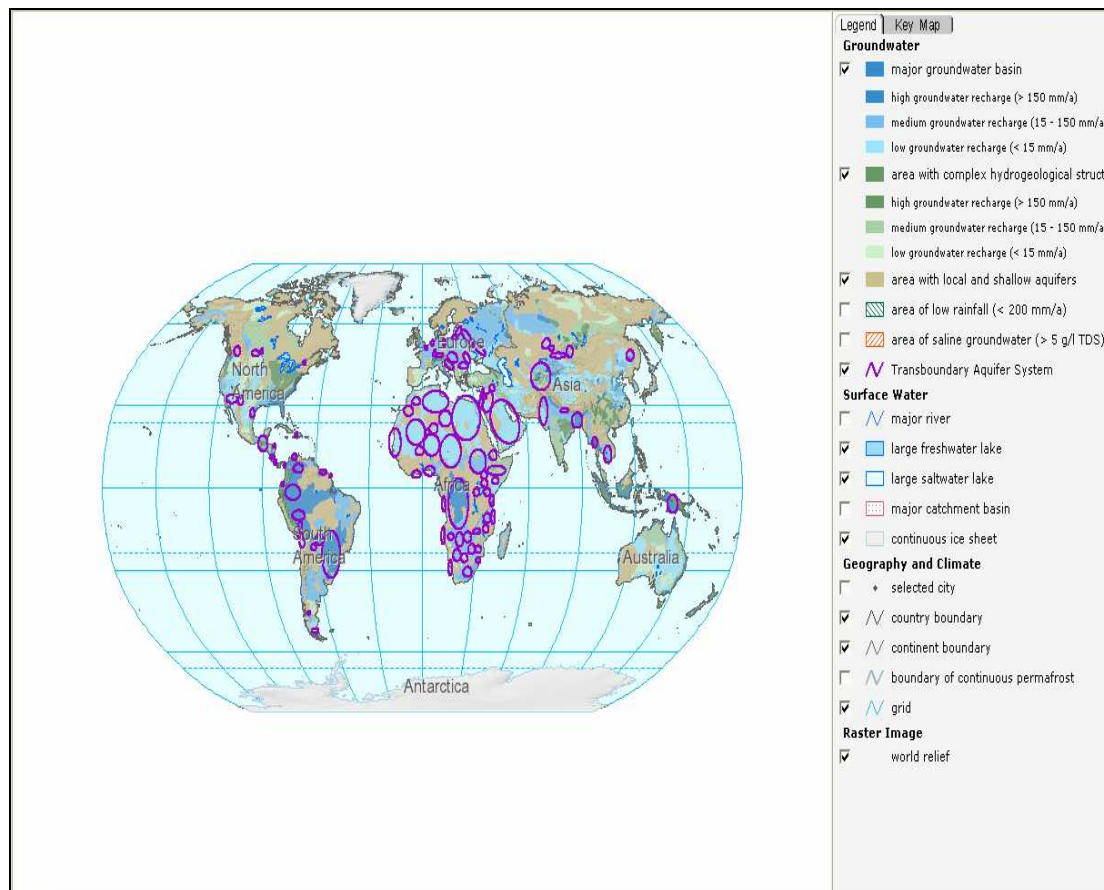
- Caracterizar fisiograficamente a bacia do rio Urubici.
- Quantificar as variáveis do balanço hídrico.
- Estimar a recarga potencial média, anual e mensal, na bacia do rio Urubici através do balanço hídrico.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Aquíferos**

Aquífero é uma formação geológica do subsolo, constituída por rochas permeáveis, que armazena água em seus poros ou fraturas. Outro conceito refere-se a aquífero como sendo, somente, o material geológico capaz de servir de depósito e de transmissor da água aí armazenada. Assim, uma litologia só será aquífera se, além de ter seus poros saturados (cheios) de água, permitir a fácil transmissão da água armazenada. Etimologicamente, aquífero significa: aqui = água; fero = transfere; ou do grego, suporte de água (BORGUETTI et al., 2004).

Os mais importantes aquíferos do mundo, tanto pela extensão quanto pela transnacionalidade, são: o Arenito Núbia Líbia, o Guaraní - Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai (1,2 milhões de km<sup>2</sup>); Egito, Chade, Sudão (2 milhões de km<sup>2</sup>); o KalaharijKaroo - Namíbia, Bostwana, África do Sul (135 mil km<sup>2</sup>); o Digitalwaterway vechte - Alemanha, Holanda (7,5 mil km<sup>2</sup>); o SlovakKarst-Aggtelek - República Eslováquia e Hungria); o Praded - República Checa e Polônia (3,3 mil km<sup>2</sup>) (UNIÁGUA, 2007). A figura 1 ilustra os principais aquíferos transfronteiriços mundial.



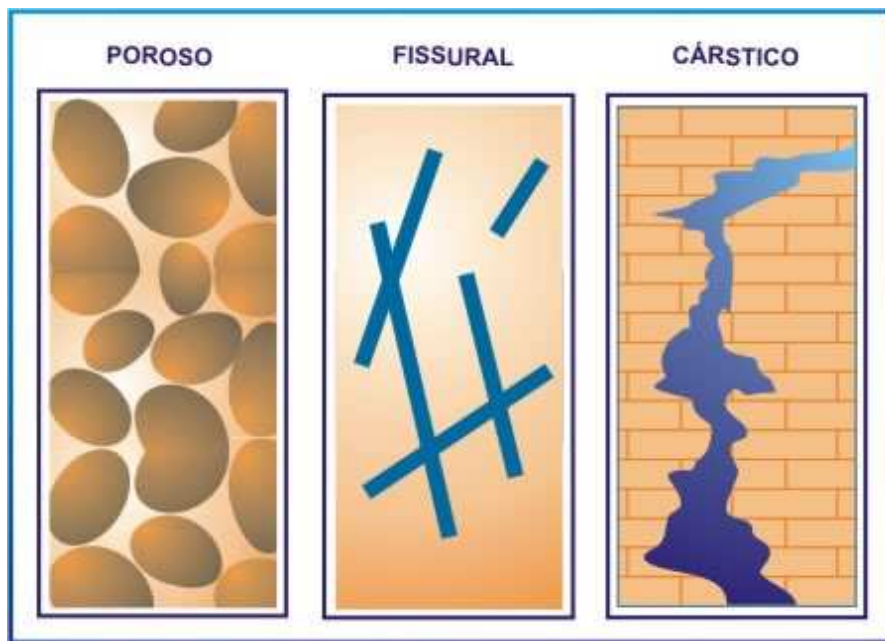
**Figura 1** – Aquíferos transfronteiriços.

**Fonte:** <http://www.whymap.org>

### 3.1.1. Tipos de Aquífero

De acordo com BORGUETTI et al. (2004), a litologia do aquífero, ou seja, a sua constituição geológica (porosidade/permeabilidade intergranular ou de fissuras) é que irá determinar a velocidade da água em seu meio, a qualidade da água e a sua qualidade como reservatório. A litologia decorre da sua origem geológica, que pode ser fluvial, lacustre, eólica, glacial e aluvial (rochas sedimentares), vulcânica (rochas fraturadas) e metamórfica (rochas calcárias), determinando os diferentes tipos de aquíferos.

Para BORGUETTI et al. (2004), quanto à porosidade, existem três tipos aquíferos, o poroso, o fissural e o cárstico, conforme ilustra a figura 3 abaixo.



**Figura 2** – Tipos de Aquífero quanto à porosidade.

Fonte: BORGHETTI et al., (2004).

- **Aquífero poroso ou sedimentar** - é aquele constituído por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água se faz nos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada. Constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e por sua ocorrência em grandes áreas. Esses aquíferos têm origem nas bacias sedimentares e em todas as várzeas onde se acumularam sedimentos arenosos. Uma peculiaridade desse tipo de aquífero é sua porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, permitindo que a água flua para qualquer direção, em função tão somente dos diferenciais de pressão hidrostática ali existente. Essa propriedade é conhecida como isotropia (BORGHETTI et al., 2004).

- **Aquífero fraturado ou fissural** - é formado por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, duras e maciças, onde a circulação da água se faz nas fraturas, fendas e falhas, abertas devido ao movimento tectônico. Ex.: basalto, granitos, gabros, filões de quartzo, etc. A capacidade dessas rochas de armazenarem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo a infiltração e fluxo da água. Poços perfurados nessas rochas fornecem poucos metros cúbicos de água por hora, sendo que a possibilidade de se ter um poço produtivo dependerá, tão

somente, desse poço interceptar fraturas capazes de conduzir a água. Nesses aquíferos, a água só pode fluir onde existir fraturas, que, na maioria das vezes, tendem a ter orientações preferenciais. São ditos, portanto, aquíferos anisotrópicos. Um caso particular de aquífero fraturado é representado pelos derrames de rochas vulcânicas basálticas, das grandes bacias sedimentares brasileiras (BORGUETTI et al., 2004).

- **Aquífero cárstico (Karst)** - é constituído por rochas calcárias ou carbonáticas, onde a circulação da água se faz nas fraturas e outras descontinuidades (diáclases) que resultaram da dissolução do carbonato pela água. Essas aberturas podem alcançar grandes dimensões, criando, nesse caso, verdadeiros rios subterrâneos. São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras, com fluxo em canais. As rochas são os calcários, dolomitos e mármore (BORGUETTI et al., 2004).

Tipos de aquífero quanto à pressão:

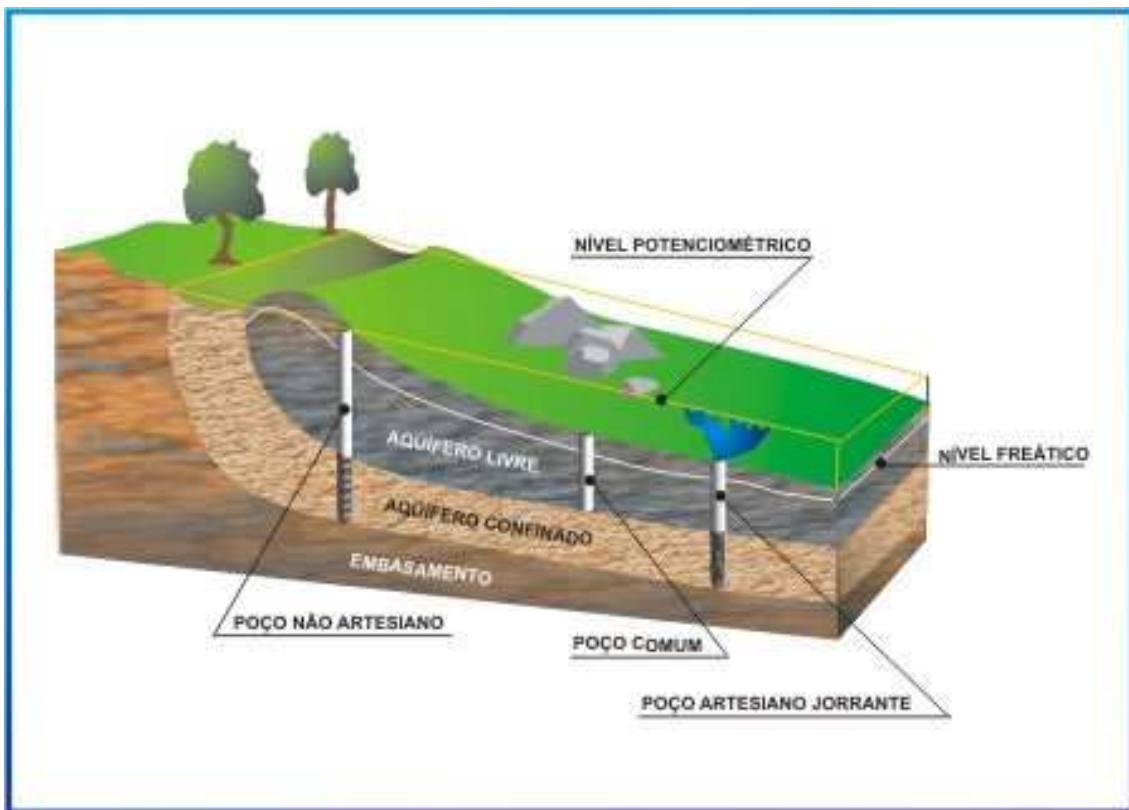
- **Aquífero livre ou freático** - é composto por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Os aquíferos livres têm a chamada recarga direta. Nos aquíferos livres o nível da água varia de acordo com a quantidade de chuva. São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação (BORGUETTI et al., 2004).

- **Aquífero confinado ou artesian** - é constituído por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água ascenda no poço para além da zona aquífera. A sua recarga, através das chuvas, dá-se preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície. Neles, o nível da água encontra-se sob pressão, assim os poços que captam as suas águas podem sofrer artesianismo. Os aquíferos confinados têm a chamada recarga indireta e quase sempre estão em locais onde ocorrem rochas sedimentares profundas (bacias sedimentares), (BORGUETTI et al., 2004).



Em uma perfuração de um aquífero confinado, a água subirá acima do teto do aquífero, devido à pressão exercida pelo peso das camadas confinantes subjacentes. A altura a que a água sobe chama-se nível potenciométrico e o furo é artesian. Numa perfuração de um aquífero livre, o nível da água não varia porque corresponde ao nível da água no aquífero, isto é, a água está à mesma pressão que a pressão atmosférica. O nível da água é designado então de nível freático, (BORGUETTI et al., 2004).

Abaixo na figura 3, podem ser visualizados todos os tipos de aquíferos quanto à pressão descritos acima.



**Figura 3** – Tipos de Aquífero quanto à pressão.  
Fonte: BORGHETTI et al., (2004).

### **3.1.2. Recarga de Aquíferos**

A recarga das águas subterrâneas vem sendo definida como o fluxo de água que alcança o aquífero, constituindo uma adição ao reservatório de água subterrânea, (DE VRIES E SIMMERS, 2002). Como apresentado por PARALTA et al. (2003), pode ainda ser conceituada como a quantidade de água que em determinado tempo entra na zona saturada (aquífero), preferencialmente a partir da percolação vertical proveniente da zona vadosa, mas também do escoamento lateral a partir das fronteiras do sistema. Ainda pode ser conceituada como um processo de movimento de água que atinge a zona saturada sob forças gravitacionais, ou em uma direção específica por condicionamento hidráulico.

Os mecanismos de recarga foram classificados em três tipos, segundo DE VRIES E SIMMERS (2002):

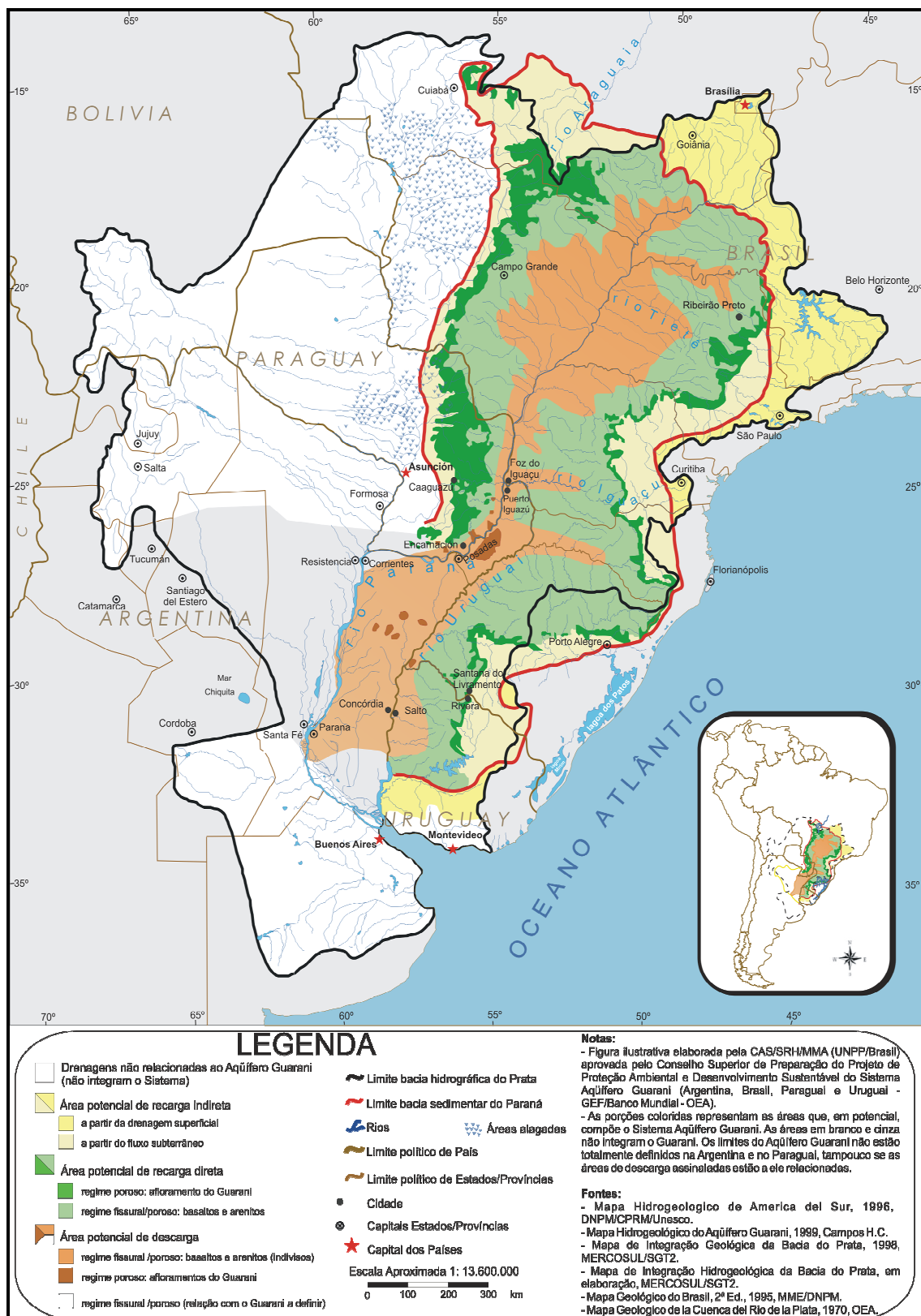
- Recarga localizada: é um processo pontual de recarga, em que a água move-se em curtas distâncias lateralmente antes da infiltração.
- Recarga direta: é um processo que acontece abaixo do ponto de impacto da precipitação por movimento vertical através da zona não-saturada. A recarga direta pode ser definida como a parcela da precipitação que vence a zona não-saturada e soma-se à reserva subterrânea;
- Recarga indireta: descreve os processos em que a recarga ocorre por características introduzidas pela urbanização, assim como por rios e depressões de superfícies topográficas (reservatórios, lagos, etc.).

### **3.2. O Sistema Aquífero Guarani – SAG**

O geólogo uruguaio Danilo Anton, em 1996, denominou de Sistema Aquífero Guarani – SAG, à unidade hidroestratigráfica formada pelos arenitos eólicos de idade Jurássica das Formações Botucatu no Brasil, Taquarembó na Argentina e Uruguai, Misiones no Paraguai. E aos depósitos flúvio-lacustres de idade Triássica das formações Pirambóia/Rosário do Sul no Brasil, Buena Vista na Argentina e Uruguai, e Misiones no Paraguai (REBOUÇAS E AMORE, 2002).

De acordo com BARRETO (2006), o Sistema Aquífero Guarani (SAG), ilustrado na figura 4, está localizado no centro leste da América do Sul, entre os paralelos 12° e

35° de latitude Sul e 47° e 65° de longitude Oeste. O SAG é um dos maiores mananciais de água doce subterrânea transfronteiriço do mundo, estendendo-se desde a Bacia Sedimentar do Paraná (Brasil, Paraguai e Uruguai) até a Bacia do Chaco Paraná (Argentina).

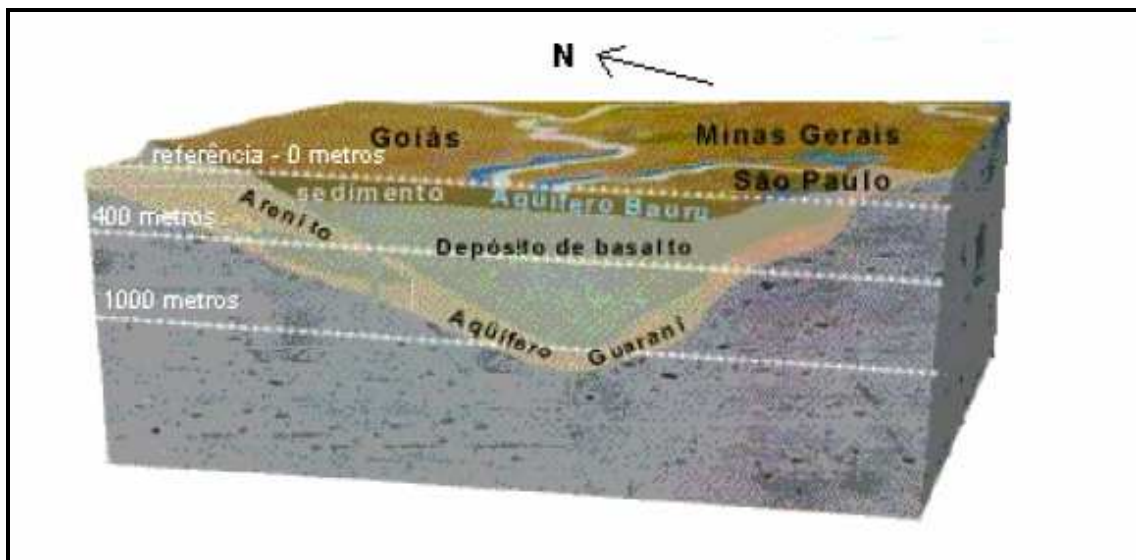


**Figura 4 – Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani.**

Fonte: <http://www.ana.gov.br/>. Site visitado em 02/09/2007.

Com aproximadamente 1.195.500 km<sup>2</sup>, o SAG é um sistema aquífero confinado, coberto sobre cerca de 90% da sua área de ocorrência pelos mais extensos derrames de rochas vulcânicas do mundo, os quais ocorreram na região durante o Jurássico Superior e Cretáceo Inferior. Estas rochas, basaltos em sua predominância, constituem a Formação Serra Geral na Argentina e Brasil, Alto Paraná no Paraguai e Arapey no Uruguai (REBOUÇAS E AMORE, 2002).

Durante o Cretáceo Superior, sobre o pacote de rochas vulcânicas se depositaram as seqüências arenosas e argilosas alternadas do Grupo Bauru no Brasil, Formação Quebrada Monardes na Argentina, Formação Acaray no Paraguai e Formação Ascencio no Uruguai (ARAÚJO et. al., 1999).



**Figura 5** – Corte transversal do Sistema Aquífero Guarani.

Fonte: BARRETO (2005)

Estima-se que as reservas permanentes de água do aquífero sejam da ordem de 45.000 km<sup>3</sup> (ou 45 trilhões de metros cúbicos), tomando como referência para o cálculo, uma espessura média aquífera de 250m e porosidade efetiva de 15%. As reservas exploráveis correspondem à recarga natural (média plurianual) e foram estimadas em 166 km<sup>3</sup>/ano ou 5 mil m<sup>3</sup>/s, representando o potencial renovável de água que circula no aquífero. A recarga natural se dá por meio da infiltração direta das águas de chuva nas áreas de afloramento das rochas do Guarani; e de forma indireta, por filtração vertical (drenança) ao longo de discontinuidades das rochas do pacote

confinante sobrejacente, nas áreas onde a carga piezométrica favorece os fluxos descendentes, (UNIÁGUA, 2007).

### **3.3. Balanço Hídrico**

#### **3.3.1. Precipitação**

A precipitação é toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são diferentes formas de precipitações (TUCCI, 2007).

As maneiras mais comuns de medir a precipitação são através do uso de pluviômetros e pluviógrafos (SANTOS et al., 2001).

O pluviômetro é um aparelho totalizador utilizado para a quantificação da chuva total acumulada num dado período de tempo. Já o pluviógrafo é um aparelho usado na quantificação da intensidade da chuva, que registra automaticamente as variações da precipitação ao longo do tempo (TUCCI, 2007).

#### **3.3.2. Escoamento Superficial**

Segundo TUCCI (2007), o escoamento superficial é a parte do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia. Quando a bacia é rural e possui cobertura vegetal, o escoamento na superfície sofre a influência desta cobertura e grande parte da água infiltra.

#### **3.3.3. Evapotranspiração**

A evapotranspiração é considerada como o processo de água perdida em uma bacia, devido à evaporação de uma superfície saturada, transpiração da vegetação ou a umidade do solo (SPEIDEL, et al., 1988, apud POMPÊO, 1990).

As plantas, o solo, e a atmosfera podem ser considerados como componentes de um sistema fisicamente inter-relacionado e dinâmico. Neste sistema, é valioso e aplicável o conceito de potencial hídrico, ou seja, o fluxo de água ocorre dos pontos de maior potencial para os de menor potencial (TUCCI, 2007).

Segundo BERLATO e MOLION (1981) apud (TUCCI, 2007), o controle exercido pela vegetação seria através de sua estrutura, afetando o albedo, a rugosidade e o sistema radicular. Na medida em que diminui a umidade do solo, ocorrem restrições à

transferência de água para a atmosfera, que passa a depender não somente das condições meteorológicas, mas também do sistema radicular das plantas, bem como de outras características, como o estado fitossanitário das mesmas. Esta condição permite distinguir entre evapotranspiração potencial e real.

**Evapotranspiração potencial (ETP):** é a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (PENMAN, 1956 apud TUCCI, 2007).

**Evapotranspiração Real (ETR):** é a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial ( $ETR \leq ETP$ ) (GANGOPADHYAYA et al., 1968 apud TUCCI, 2007).

Informações confiáveis sobre evapotranspiração real são escassas e de difícil obtenção, pois demandam um longo tempo de observação e demandam muito dinheiro. No entanto, a evapotranspiração potencial, pode ser obtida a partir de modelos baseados em leis físicas e relações empíricas de forma rápida e suficientemente precisas (TUCCI, 2007).

### 3.3.4. Infiltração

A água da chuva pode seguir várias direções: uma parte cai diretamente na superfície do terreno, uma outra parte é interceptada pela copa das árvores, da qual uma parte chega ao solo por gotejamento das folhas ou por escoamento de tronco (COELHO NETO, 1995). Quando a água atinge a superfície do terreno, ela pode correr pela superfície ou infiltrar no solo.

A infiltração pode ser definida como a passagem de água da superfície para o interior do solo. Portanto é um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presente no seu interior (TUCCI, 2007).

Para COELHO NETO (1995), muitas variáveis regulam a capacidade de infiltração:

- Características físicas da chuva: a intensidade da chuva, junto com as demais variáveis do solo, definem o que entra e o que excede a capacidade de infiltração; as chuvas mais intensas causam maiores impactos no solo exposto, e os picos de chuva de longa duração preenchem o potencial de estocagem e eventualmente conduzem os solos à saturação.

- Condições de cobertura do solo: a cobertura vegetal tende a aumentar a capacidade de infiltração; solos recobertos por florestas geralmente apresentam as maiores capacidades de infiltração, especialmente pela influência da serrapilheira. A redução na densidade da cobertura vegetal é acompanhada pelo decréscimo da infiltração.

- Condições especiais do solo: se por um lado, a compactação pelo impacto das chuvas e a selagem por partículas finas deslocadas pelo salpico das gotas de chuva promovem uma diminuição da água infiltrada, por outro, o aumento da carga hidráulica na superfície ou das rachaduras de ressecamento do solo ou de declive da superfície aumentam a infiltração.

- Condições de textura, profundidade e umidade antecedente do solo: estas variáveis exercem influência na definição da quantidade de água que poderá ser estocada antes do solo atingir a saturação: solos profundos e bem drenados, com texturas grosseiras e grandes quantidades de matéria orgânica apresentarão alta capacidade de infiltração. Já os solos rasos e mais argilosos mostrarão baixas taxas e volumes de infiltração; a umidade antecedente, se por um lado reduz a ação capilar que inibe a infiltração, por outro, limita o volume de água que pode ser estocado no solo, especialmente nos mais finos.

- Atividade biogênica no topo dos solos: a formação de bioporos pela atividade da fauna e do enraizamento dos vegetais aumenta a capacidade de infiltração e a percolação.

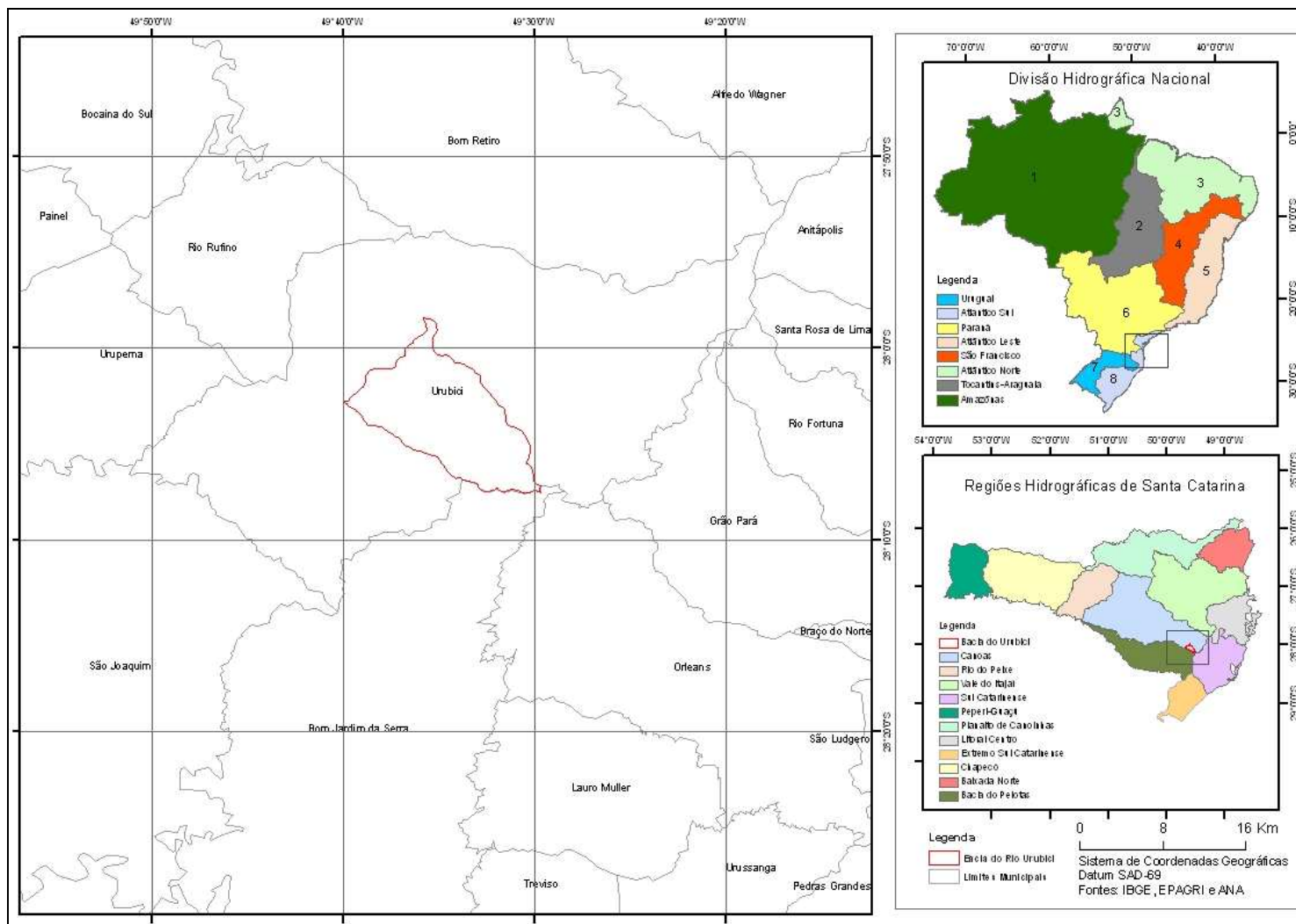


#### **4. ÁREA DE ESTUDO**

A área estudada nesse trabalho, bacia do Rio Urubici, de acordo com a divisão hidrográfica nacional, está inserida na região hidrográfica do Uruguai, a qual tem grande importância para o país em função das atividades agroindustriais desenvolvidas e por seu potencial hidrelétrico.

Já em relação à Santa Catarina e suas principais divisões em regiões hidrográficas, a bacia do rio Urubici está situada na região do Planalto de Lages, da qual fazem parte os rios Pelotas e Canoas, os quais são os principais contribuintes na formação do rio Uruguai e têm suas nascentes nas Serras, Geral e do Mar, com altitudes que chegam a quase 2000 m.

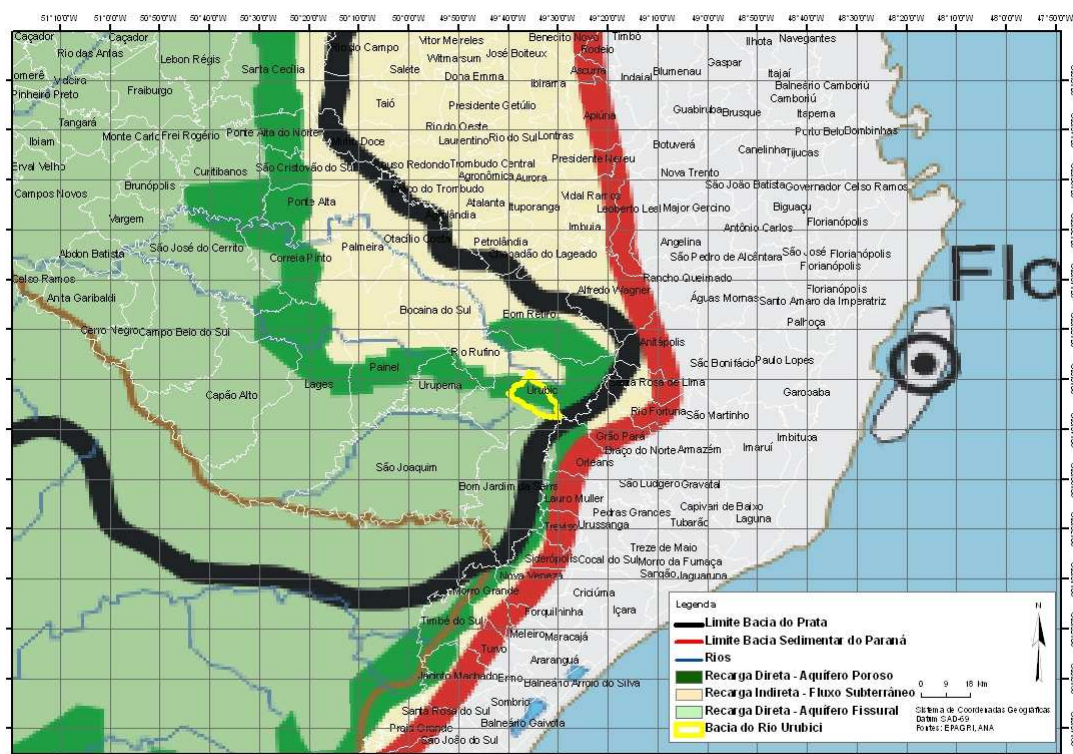
No âmbito político, a bacia do rio Urubici está localizada inteiramente no município de Urubici que faz fronteiras com outros 12 municípios de Santa Catarina, entre eles São Joaquim, Bom Jardim da Serra e Bom Retiro. Na figura 6, pode-se visualizar a localização do município de Urubici e a bacia hidrográfica do estudo em questão.



**Figura 6 – Mapa de localização da área de estudo.**

O município de Urubici, segundo o último censo do IBGE realizado em 2007, possui uma população de 10.622 habitantes, numa área total de 1007 km<sup>2</sup>. Urubici apresenta uma grande variedade étnica, explicitada por culturas de diversas origens, indígena, tropeira, européia (italianos, alemães, letos, entre outros), distribuídas por toda sua área. Isto se torna evidente quando se observa a diversidade de religiões, tipologias arquitetônicas, festas, lendas e registros deixados pelas populações passadas (sítios arqueológicos) (CALLADO, 2003).

Como poder ser observado na figura 8, a bacia do rio Urubici está inserida em zona de recarga direta do Aquífero Guarani.



**Figura 7** – Zona de Recarga do Aquífero Guarani, na Bacia do Rio Urubici.

**Fonte:** Modificado de <http://www.ana.gov.br/>. Site visitado em 02/09/2007.

Segundo Köppen, a região apresenta um clima mesotérmico úmido, uma vez que as temperaturas do mês mais frio estão entre 18°C e - 3°C (Temperatura média de julho: 11,57°C). Enquadra-se ao tipo de clima úmido (f), sem estações de seca definidas, pois não ocorrem índices pluviométricos inferiores a 60 mm mensais. Ainda, classifica-se por apresentar um subtipo com verão ameno (b), pois a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C, (FERREIRA, 2006).

As fotos mostradas a seguir, Figuras 8 a 12, foram produzidas numa visita a bacia do rio Urubici realizada no dia 25/01/2008.



**Figura 8** – Vista do divisor de água e de parte da bacia



**Figura 9** – Corte no divisor de água para passagem de estrada, arenito Botucatu exposto.



**Figura 10** – Detalhe do arenito Botucatu





**Figura 11** – Rio Urubici



**Figura 12** – Rio Urubici e o seu leito formado pelo arenito Botucatu

## 5. METODOLOGIA

### 5.1. Criação do Banco de Dados e Seleção de Ferramentas de Trabalho

Para que fosse possível dar início aos estudos foi imprescindível à estruturação de um banco de dados e também, a seleção de algumas ferramentas computacionais, úteis na execução do trabalho. Na tabela 1 encontra-se a esquematização do banco de dados utilizado no trabalho.

**Tabela 1** – Estruturação do Banco de Dados.

BANCO DE DADOS	
<ul style="list-style-type: none"><li>HIDROWEB – ANA</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Mapa georreferenciado das regiões hidrográficas nacionais;</li><li>- Mapa georreferenciado da bacia do Uruguai e sua infra-estrutura;</li><li>- Inventário das estações pluviométricas e fluviométricas nacionais;</li><li>- Séries históricas de vazão e precipitação;</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>EPAGRI/CIRAM</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Mapa georreferenciado das unidades hidrográficas do estado de Santa Catarina;</li><li>- Cartas topográficas da Mapoteca Topográfica Digital de Santa Catarina;</li><li>- Estimativa da evapotranspiração para todo o estado;</li><li>- Modelo digital de elevação do terreno;</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>IBGE</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Mapas digitais das divisões políticas do estado de Santa Catarina e Rio Grande do Sul;</li></ul>
FERRAMENTAS	
<ul style="list-style-type: none"><li>ArcInfo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Aplicativo utilizado na visualização e edição de mapas e dados georreferenciados, georreferenciamento de imagens e geoprocessamento;</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>Google Earth</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Visualização de imagens de satélite e aquisição de pontos georreferenciados;</li></ul>

## 5.2. Caracterização Fisiográfica da Bacia

### 5.2.1.. Área de Drenagem e Perímetro da Bacia

A área de drenagem e o perímetro da bacia do rio Urubici foram adquiridos pelo arquivo do tipo shapefile das unidades hidrográficas do estado de Santa Catarina disponibilizados pela Epagri no seu endereço eletrônico (<http://www.epagri.rct-sc.br>). Os valores da área e do perímetro fornecidos foram recalculados utilizando-se ferramentas de cálculo do aplicativo Arcgis e posteriormente comparados.

### 5.2.2. Coeficiente de Compacidade

O coeficiente de compacidade ou índice de Gravelius ( $K_c$ ) relaciona o perímetro da bacia e a circunferência de área igual à da bacia e pôde ser determinado pela equação 1 a seguir, (LISBOA, 1995):

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Onde,

P: Perímetro da bacia em Km;

A: Área da bacia em Km<sup>2</sup>.

Este coeficiente é um número adimensional e varia com a forma da bacia, quanto maior o coeficiente de compacidade, mais irregular é a bacia e menor é a tendência a enchentes, (LISBOA,1995).



### 5.2.3. Fator de Forma

O fator de forma (Kf) relaciona a largura média e o comprimento axial da bacia e é dado por, (LISBOA, 1995):

$$\boxed{Kf = \frac{L_{med}}{L}} \text{ mas, } \boxed{L_{med} = \frac{A}{L}} \rightarrow \text{Logo, } \boxed{Kf = \frac{A}{L^2}} \quad (2)$$

Onde,

L: distância seguida entre o curso d'água mais longo desde o exutório até a cabeceira

L<sub>med</sub>: largura média da bacia.

### 5.2.4. Altimetria

Para esse tópico foi elaborado um mapa no aplicativo Arcgis com as altitudes espacializadas em intervalos de 300m (Fig.21). O programa utiliza as curvas de nível do terreno para gerar um vetor do tipo TIN (Triangulate Irregular Network) que é uma rede triangular que representa a superfície do terreno, onde os vértices dos triângulos dessa rede possuem os valores das cotas do terreno, as quais foram usadas como dados de entrada na geração desse mapa com as diferentes altitudes do relevo da bacia.

### 5.2.5. Rede de drenagem

O sistema de drenagem de uma bacia é compreendido pelo rio principal e seus tributários. Para a confecção da rede de drenagem da bacia em questão foi utilizado um modelo de elevação do terreno (MDT) do Planalto de Lages, o qual foi obtido na mapoteca da EPAGRI, e para efeito de cálculo do programa Arcgis considerou-se como critério para a formação da rede de drenagem que para formar um curso d'água, ele necessitava receber uma contribuição de 500 células do MDT, onde cada célula possui dimensões de 30 x 30m.

### 5.2.6. Classificação dos rios segundo Strahler

O critério utilizado por Strahler para classificar uma bacia hidrográfica, foi, na realidade, uma modificação da classificação de Horton. Segundo Strahler, são considerados de primeira ordem os pequenos canais que não sejam tributários. Quando dois canais de primeira ordem se unem é formado um segmento de segunda ordem. Da junção de dois rios de segunda ordem, vem o de terceira ordem, e assim sucessivamente, seguindo a ordem  $n + 1$ , esse método foi utilizado, pois assim evita-se a subjetividade na determinação das nascentes (LISBOA, 1995).

### 5.2.7. Densidade Drenagem

A densidade de drenagem de uma bacia hidrográfica denota quão desenvolvida é o seu sistema de drenagem. Este índice foi calculado pela relação entre o comprimento total dos cursos d'água da bacia e a sua área total. Para tanto, é dada a seguinte equação (LISBOA, 1995).

$$\boxed{Dd = \frac{\sum L}{A}} \quad (3)$$

Onde,

Dd é a densidade de drenagem;

$\sum L$  representa a soma dos comprimentos dos rios;

A é a área de drenagem.

### 5.2.8. Declividade

A declividade da bacia é, em boa parte, o fator controlador da velocidade com que ocorre o escoamento superficial e consequentemente, afeta o tempo que a água da chuva leva para concentrar-se nos leitos fluviais que constituem a rede de drenagem (LISBOA, 1995). O valor da declividade da bacia em questão foi calculado pelo aplicativo Arcgis, o qual utilizou as informações de altitude contidas no vetor TIN gerado no item anterior, para calcular as declividades de cada célula triangular que compõe a rede.

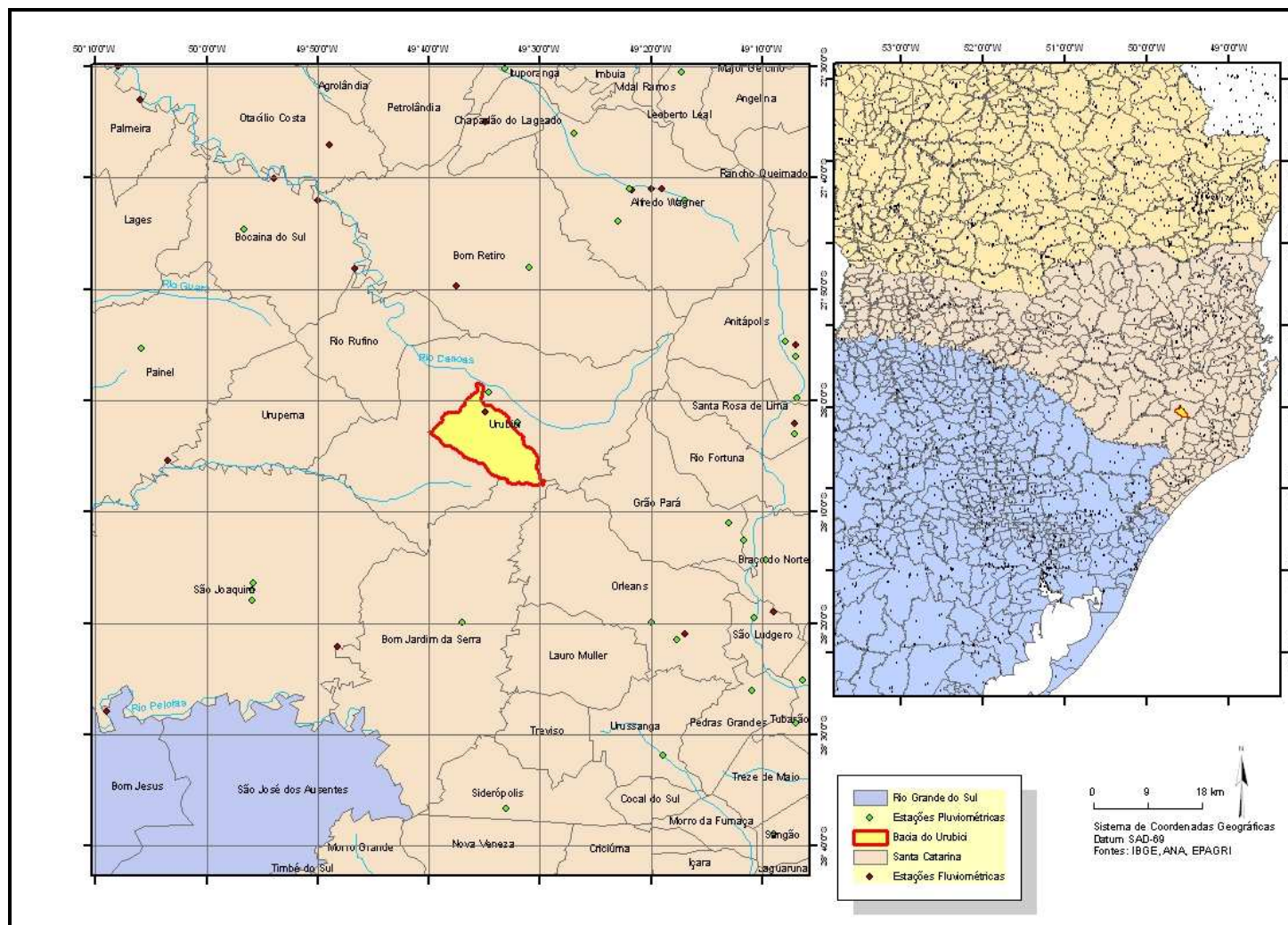
### **5.2.9. Representação da Bacia em 3D**

A vista em três dimensões da bacia foi feita através do programa ArcScene, utilizando como dado de entrada o TIN gerado no item 5.2.4, e foi usado um fator de exagero de 2 unidades, para dar destaque ao relevo e assim melhorar a visualização da bacia.

### **5.3. Identificação da Rede de Monitoramento na Bacia**

Essa etapa do trabalho foi muito importante, pois permitiu conhecer a infraestrutura na bacia e em áreas adjacentes, quanto à existência de estações pluviométricas e fluviométricas e a disponibilidade dos dados indispensáveis ao estudo, como históricos de longo período de vazão e precipitação. Foram adquiridos no Sistema Nacional de Informações Hidrológicas da ANA, Hidroweb, os inventários da distribuição e localização das estações relevantes e também os históricos já mencionados (ANA, 2007).

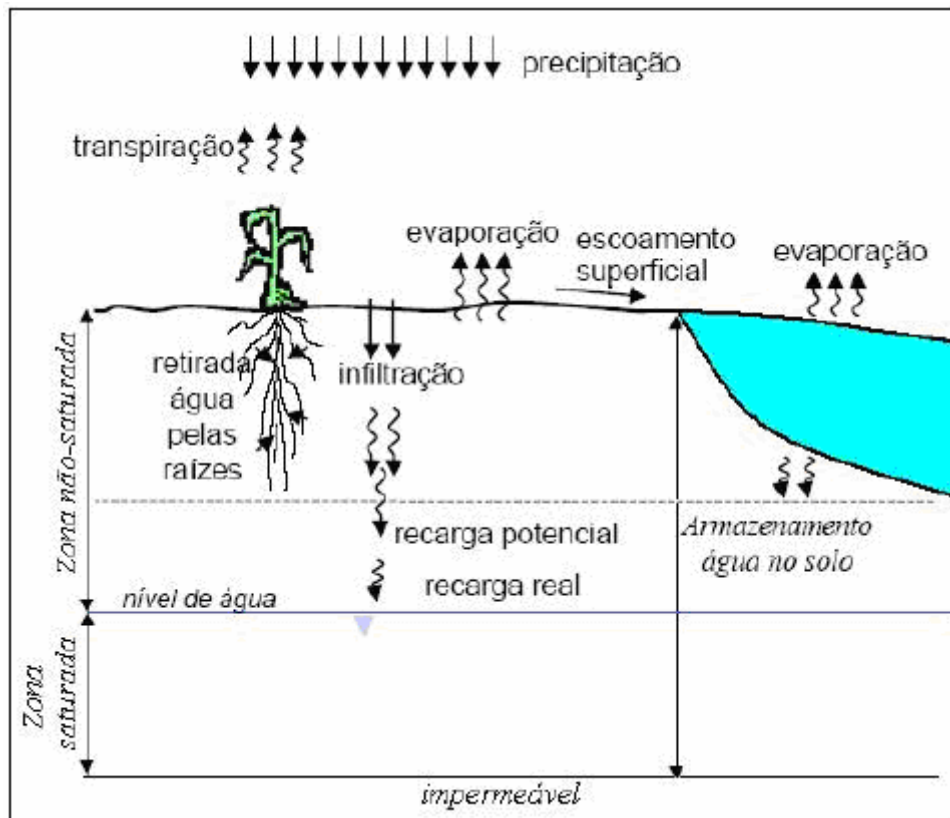
A figura 13 ilustra a rede de monitoramento da Bacia de Urubici e seu entorno.



**Figura 13** – Rede de Monitoramento na bacia de Urubici e proximidades.

#### 5.4. Balanço Hídrico – Método Utilizado

Para o cálculo do balanço hídrico, será utilizada a equação 4 e nos itens subsequentes serão detalhadas as variáveis envolvidas no cálculo e os métodos que serão usados nas suas obtenções. Abaixo na figura 14 segue um esquema didático do ciclo hidrológico para o balanço hídrico.



**Figura 14** - Variáveis do ciclo hidrológico para o balanço hídrico.

Fonte: Adaptado de BARRETO (2005).

O balanço hídrico na bacia será realizado pela equação:

$$I = V_P - V_Q - V_E \quad (4)$$

Sendo:

$V_P$ , volume médio precipitado anualmente, obtido de uma sequência de dados históricos de chuva em um longo período de tempo (t).

$V_Q$ , volume médio escoado no tempo (t).

$V_E$ , o volume médio evapotranspirado no intervalo (t).

I, a infiltração, que dará sentido ao balanço hídrico, pois se positivo, indicará que está havendo uma possível recarga potencial do aquífero, contudo, não dará para afirmar, sem outros estudos, que a água infiltrada atingirá efetivamente a zona saturada (aquífero). Porém se negativo, indicará uma potencial descarga do aquífero.

#### **5.4.1. MÉTODO 1 - Cálculo do balanço hídrico utilizando as médias anuais das variáveis hidrológicas.**

Esse método foi utilizado para estimar a infiltração anual média na bacia do rio Urubici, ou seja, a recarga potencial do Aquífero Guarani.

##### **5.4.1.1 Regionalização de Vazões**

Devido à inexistência de monitoramento fluviométrico na bacia do rio Urubici, utilizou-se do estudo de regionalização das vazões médias de longo termo, realizado por um consórcio de empresas privadas, contratadas, em parceria, pelas Secretarias de Estado da Agricultura e Desenvolvimento Rural e a de Desenvolvimento Sustentável, para servir como instrumento de gestão em bacias onde não existiam séries históricas de dados fluviométricos, ou onde as mesmas não eram confiáveis.

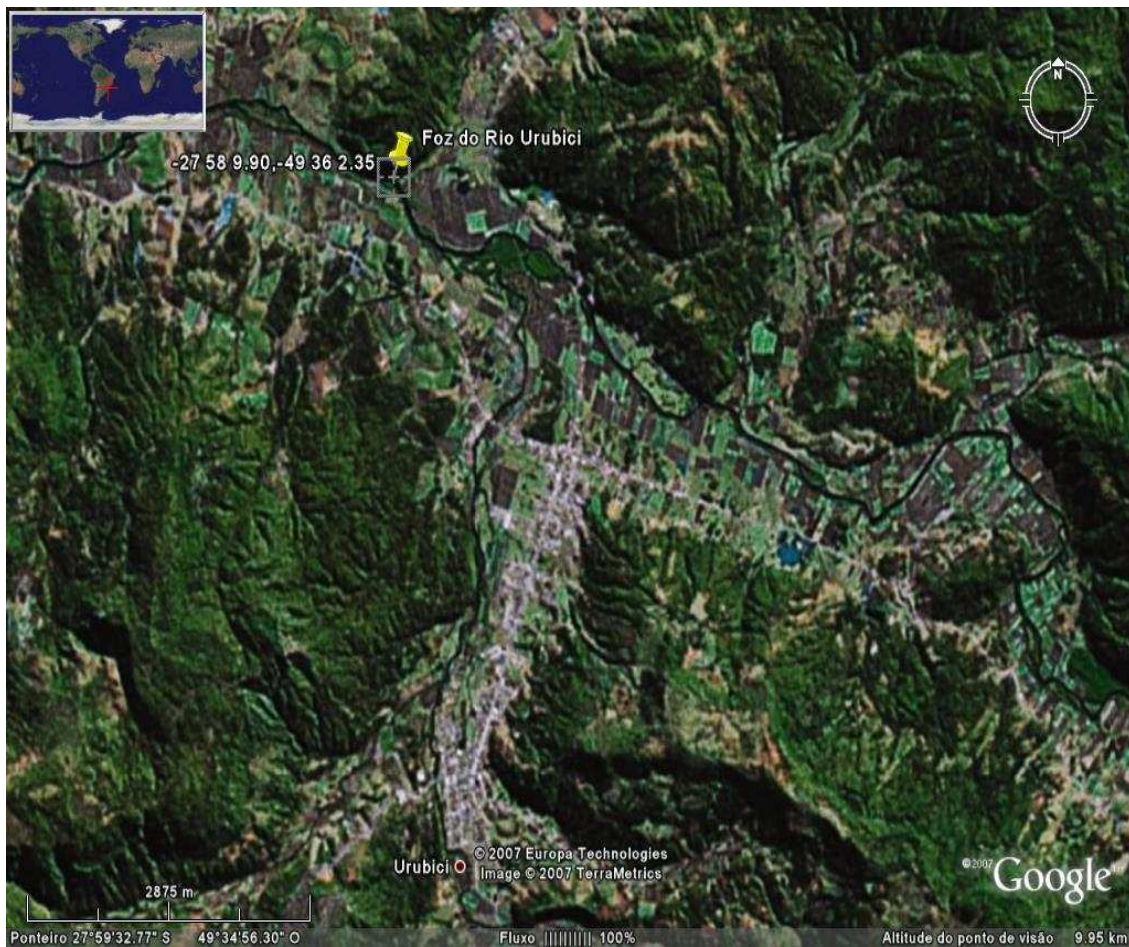
Esses estudos de regionalização foram desenvolvidos com base em séries de vazões naturais reconstituídas com base em avaliações da evolução temporal dos usos consumptivos das bacias hidrográficas estaduais do Estado de Santa Catarina. Portanto, os resultados obtidos com as relações funcionais, mostrado na equação 5, referem-se às vazões naturais.

Os estudos de regionalização definiram as diversas relações funcionais que permitiram obter os parâmetros hidrológico-estatísticos que caracterizam a disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica estadual a partir da precipitação média anual e a área de drenagem. Esse estudo fornece uma metodologia de aplicação da regionalização na bacia de interesse, como mostrado a seguir:



### 1) Obtenção das coordenadas da seção de interesse da bacia hidrográfica;

As coordenadas geográficas da foz do rio Urubici foram obtidas através da visualização da imagem de satélite (Fig.15) do sistema Google Earth.

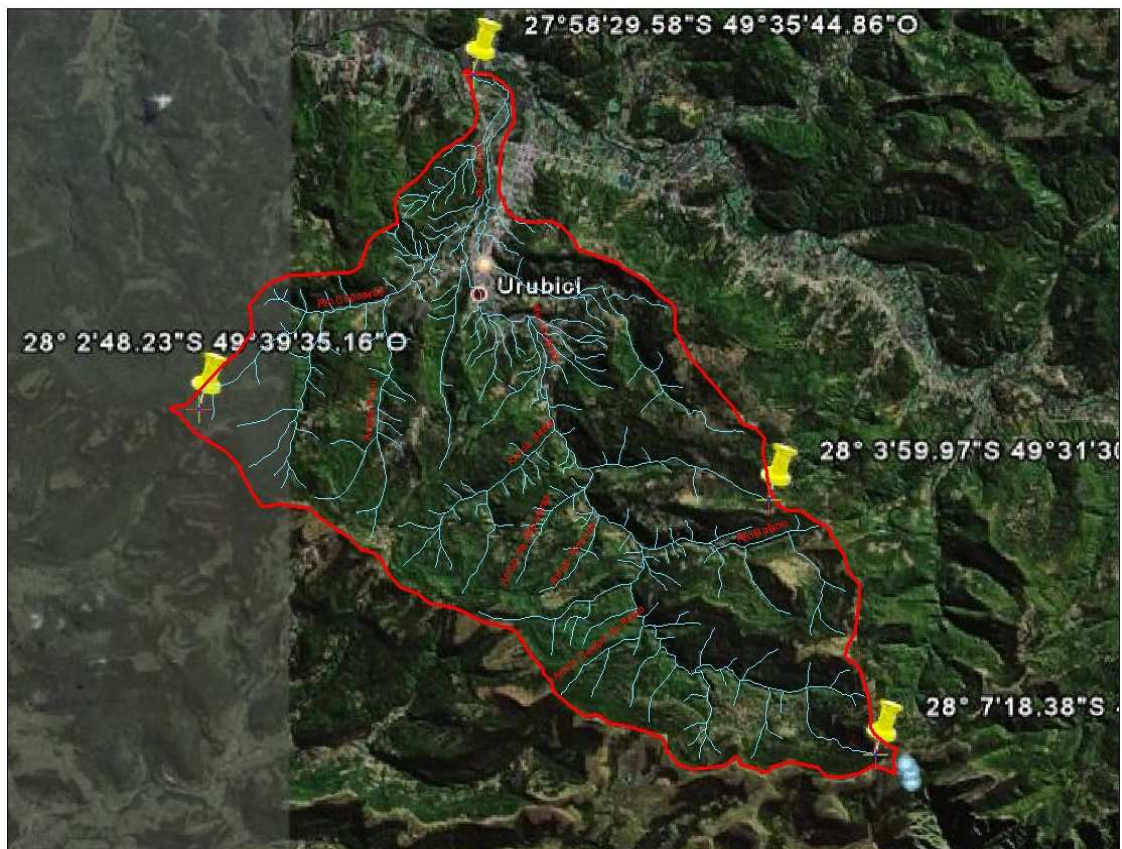


**Figura 15** – Imagem de Satélite usada na obtenção das coordenadas da seção de interesse, no caso a Foz do Rio Urubici.

**Fonte:** Google Earth.

## 2) Delimitação da bacia hidrográfica na seção de interesse;

A delimitação da bacia foi feita através do georreferenciamento da imagem de satélite (Fig.15) utilizando-se pontos conhecidos da hidrografia digital fornecida pela Epagri (EPAGRI, 2007).



**Figura 16** – Imagem de Satélite georreferenciada no software Arcgis, para delimitação da bacia hidrográfica que contribui na seção de interesse.

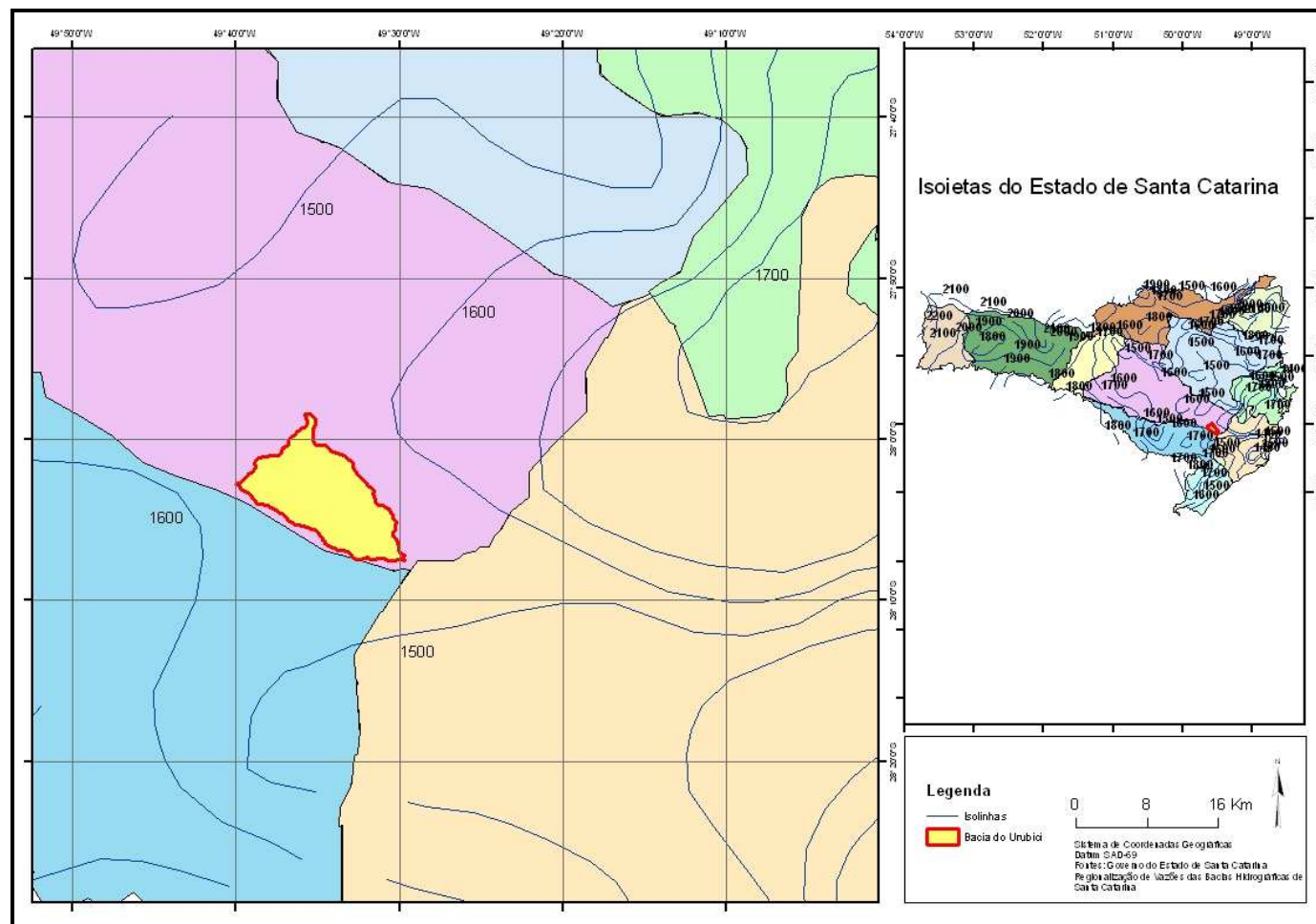
**Fonte:** Google Earth e EPAGRI

## 3) Determinação da área de drenagem na bacia de interesse;

A área de drenagem da bacia do Rio Urubici foi obtida na caracterização fisiográfica, como mostra o item 5.2.1.



**4) Determinação da precipitação média anual através da metodologia da média ponderada das áreas limitadas pelas isoietas, utilizando a distribuição isoietal apresentada na figura 17.**



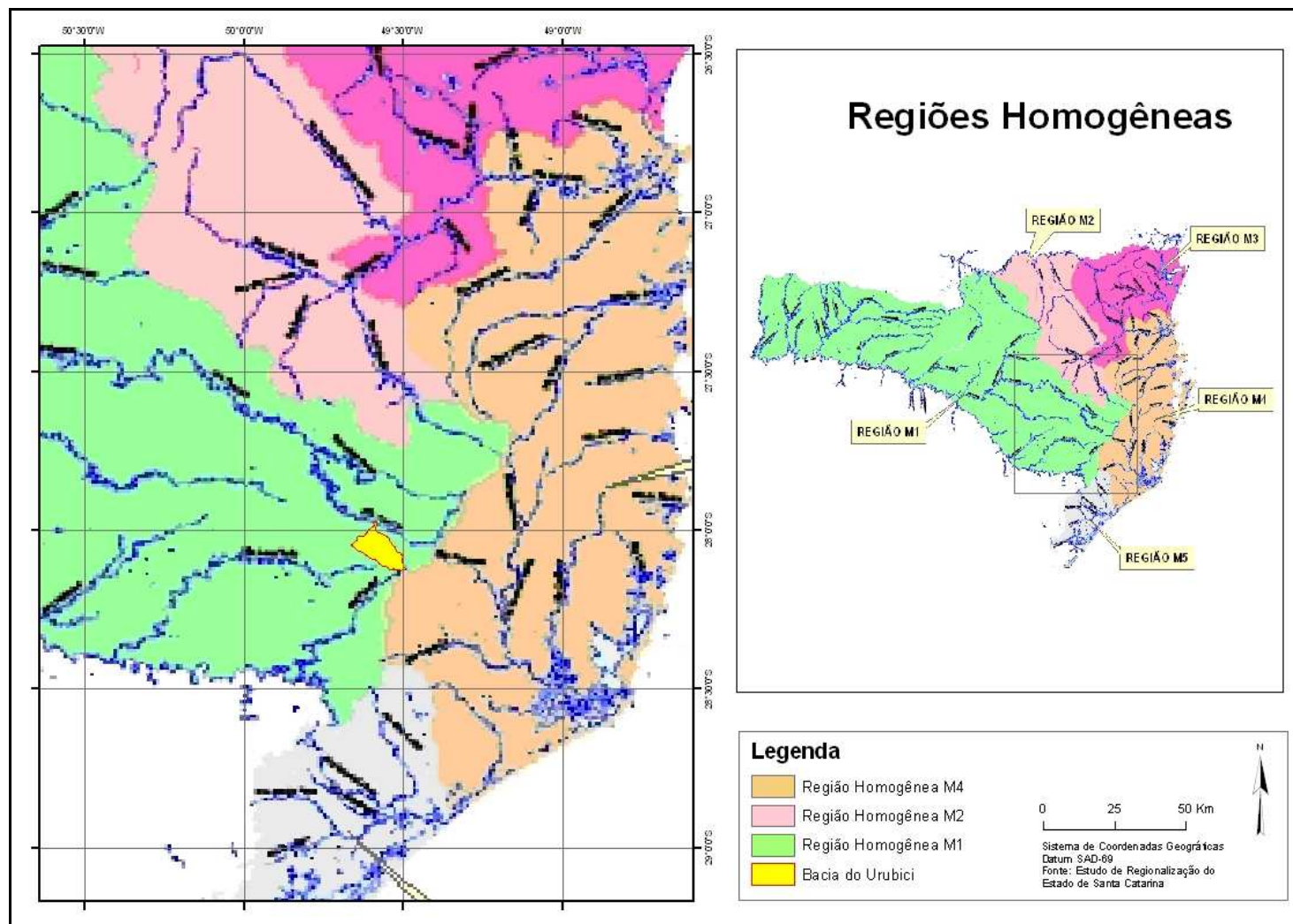
**Figura 17** – Posição da bacia de Urubici em relação às isoietas (mm) do Estado de Santa Catarina.

**Fonte:** (BRASIL, 2006)

Como mostrado na figura 17, a bacia do Urubici está situada entre isolinhas de precipitação média anual de 1500 a 1600 mm. Portanto utilizou-se para os cálculos das outras variáveis o intervalo de 1501 a 1599 mm, já que as isolinhas estão dispostas em intervalos de 100 mm, não podendo assim, determinar apenas um valor de precipitação, mas um intervalo de valores.

**5) Identificação, a partir da localização da seção de interesse (Fig.18), a região homogênea M1 a M5 quanto à vazão média de longo termo.**

A figura 18 mostra regiões homogêneas que foram desenvolvidas segundo características fisiográficas e de precipitação que essas regiões têm em comum.



**Figura 18** – Regiões Homogêneas do Estado de Santa Catarina.

A equação 5 é o resultado do estudo estatístico para a região M1 (BRASIL, 2006).

Equação de regionalização para a região homogênea M1

$$Q_{MLT} = 1,240.10^{-4} . P^{0,759} . AD^{0,968} \quad (5)$$

Onde:

QMLT (m³/s): Vazão Média Anual de Longo Termo para a região homogênea M1;

P (mm): Precipitação média anual determinada pelo método das isoietas estaduais descrito acima;

AD (km²): Área de drenagem da bacia do rio Urubici;

#### **5.4.2. MÉTODO 2 – Cálculo do balanço hídrico utilizando as médias mensal e anual das variáveis hidrológicas.**

##### **5.4.2.1. Precipitação**

Foi utilizado o método dos Polígonos de Thiessen para a determinação das precipitações médias mensais e anuais.

Polígonos de Thiessen são áreas de “domínio” de um posto pluviométrico. Considera-se que no interior dessas áreas a altura pluviométrica é a mesma do respectivo posto.

As precipitações médias podem ser determinadas pela equação a seguir:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{P}_i}{A} \quad (11)$$

$\bar{P}$  : é a precipitação média na bacia (mm);

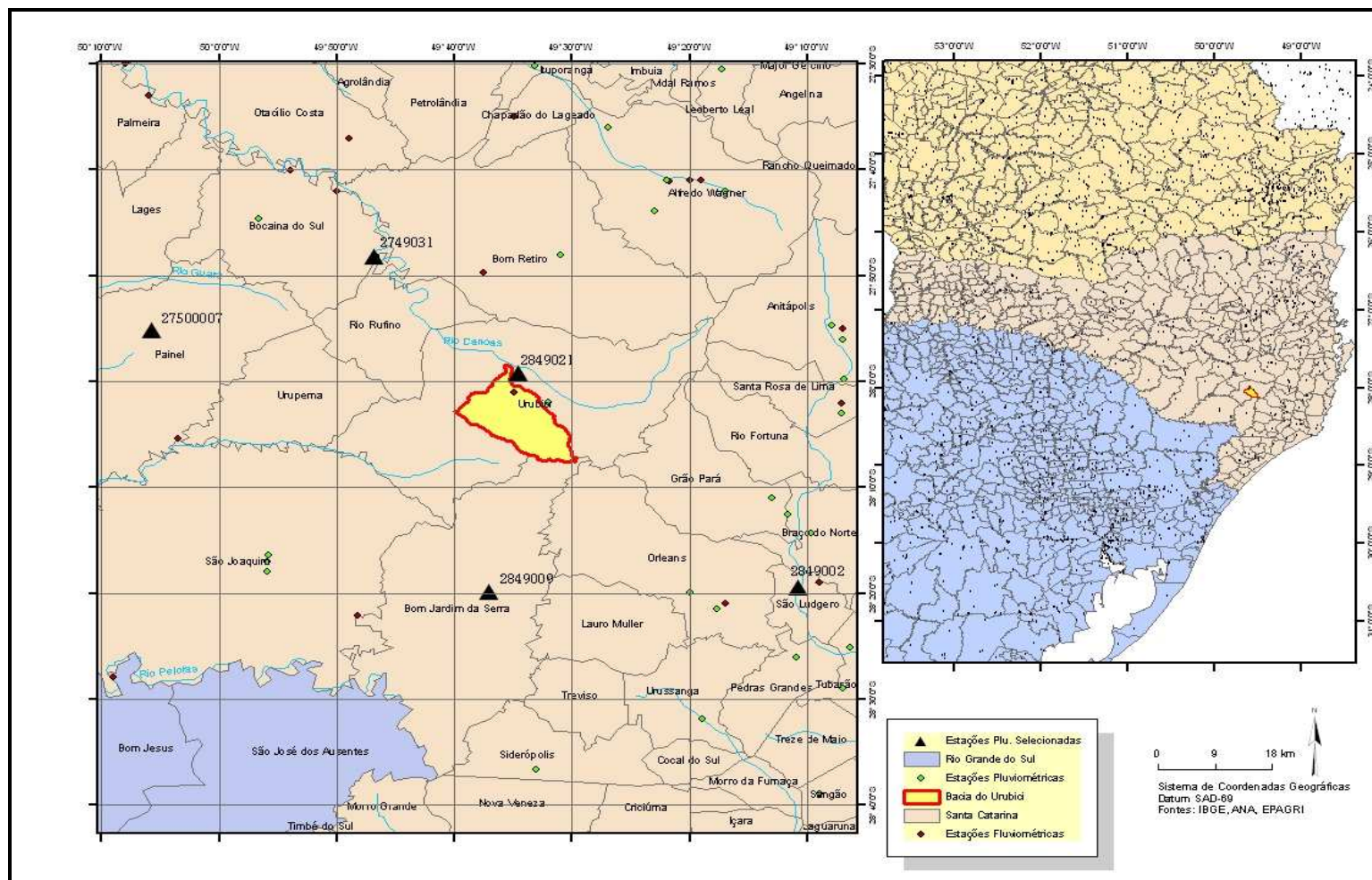
$\bar{P}_i$  : é a precipitação média no posto i (mm);

$A_i$  : é a área do respectivo polígono, dentro da bacia (km²);

A: é a área total da bacia;

Para o traçado dos polígonos, foi necessária a identificação de postos pluviométricos representativos (figura 19), que pudessem ter influência direta na bacia e que também possuíssem uma série histórica de pelo menos 20 anos de registro de dados consistidos. Essas séries históricas foram obtidas no hidroweb da ANA (ANA, 2007).

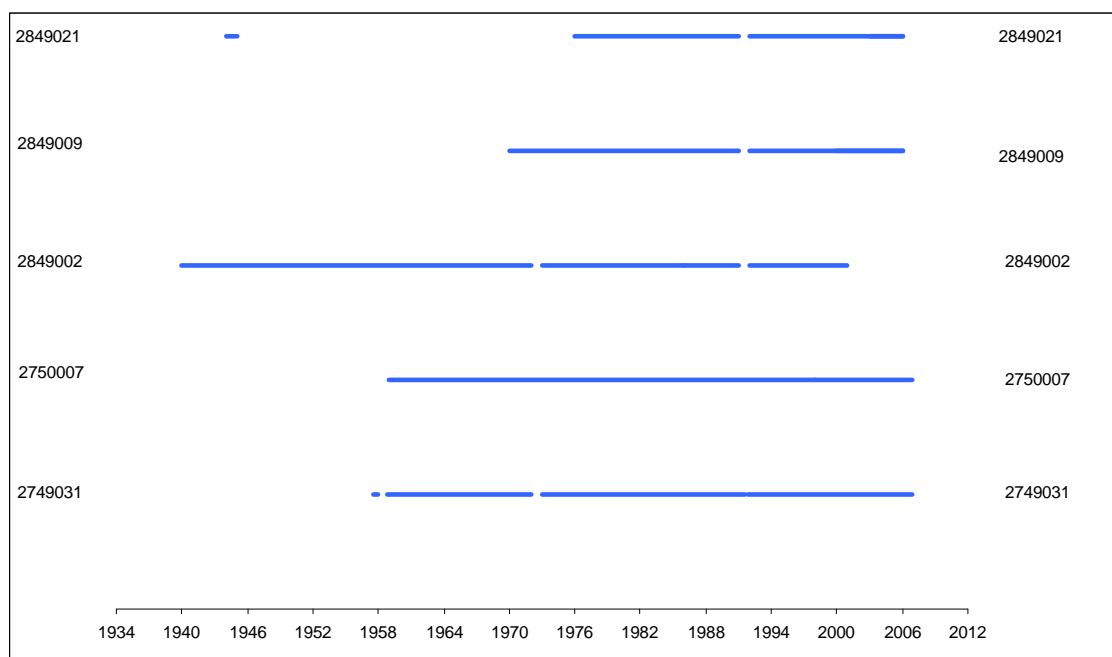
A tabela 2 apresenta um inventário das estações pluviométricas que foram utilizadas para o traçado dos polígonos e a figura 20 ilustra um diagrama da disponibilidade temporal dos dados de precipitação média mensal de cada estação.



**Figura 19 – Estações Pluviométricas selecionadas para obtenção das séries históricas.**

**Tabela 2** - Inventário das estações pluviométricas na bacia do rio Urubici e áreas adjacentes de relevância ao estudo.

Código	Nome da Estação	Município	Latitude	Longitude	Altitude
2749031	Vila Canoas	Lages	-27 48 09	-49 46 41	900
2750007	Painel	Lages	-27 55 17	-50 05 55	1196
2849002	São Ludgero	Rio Braço do Norte	-28 19 33	-49 10 45	40
2849009	Bom Jardim da Serra	Bom Jardim da Serra	-28 20 00	-49 37 00	1200
2849021	Urubici	Urubici	-27 59 19	-49 34 39	997



**Figura 20** – Diagrama dos períodos de disponibilidade dos dados de precipitação média mensal.



A tabela 3 exibe o código das estações pluviométricas, o nome de cada uma, o total de anos disponíveis para cada posto, o número de anos completos que foram utilizados no estudo e a precipitação média de cada posto de monitoramento.

**Tabela 3** – Quantificação do período de tempo utilizado no estudo e precipitação média anual, por estação de monitoramento.

<b>Código</b>	<b>Estação</b>	<b>Anos Totais</b>	<b>Anos Completos</b>	<b>Precipitação Média Anual (mm)</b>
2749031	Vila Canoas	49	44	2172
2750007	Painel	48	46	1616
2849002	São Ludgero	66	62	1354
2849009	Bom Jardim da Serra	36	33	1558
2849021	Urubici	33	29	1599

Fonte: Hidroweb – ANA

Devido à baixa densidade de postos de monitoramento de chuva na região, a bacia do Urubici ficou totalmente inserida no domínio do polígono da estação pluviométrica de Urubici, portanto foram usadas apenas as séries históricas dessa estação na estimativa das precipitações médias mensais de longo período.

#### 5.4.2.2. Vazão

O Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) desenvolveu, em 2001, o Estudo de Regionalização de vazões para a Bacia do Rio Uruguai, com objetivo de realizar os estudos de regionalização hidrológica das vazões características de longo termo da bacia do Uruguai integrando os dados consistidos das estações fluviométricas localizados nas sub-bacias 70 a 77 que dividem a bacia do Uruguai, o qual inclui a Bacia do Rio Urubici (FERREIRA, 2006).

A seguir está representada a equação de regionalização de longo período (FERREIRA, 2006):

$$Q = 0,0216A^{0,948}P^{1,075} \quad (12)$$

Q (m<sup>3</sup>/s): Vazão média de longo termo;

A (Km<sup>2</sup>): Área de drenagem da bacia estudada;

P (m): Precipitação média de longo termo;

#### 5.4.2.3. Evapotranspiração

THORNTHWAITE e WILM (1944) apresentaram sua primeira equação (8) para a determinação da evapotranspiração potencial (ETP), envolvendo o comprimento do dia, a temperatura média diária e a umidade relativa do ar. Ao refinar a equação, o termo da umidade relativa foi suprimido (TUCCI, 2007).

O método utiliza a temperatura média mensal para calcular a evapotranspiração potencial mensal, tendo por base um índice de eficiência de temperatura anual  $I$ , definido como a soma de 12 valores mensais de índice de calor  $i$ . Cada índice de calor  $i$  é uma função da temperatura média mensal  $t_i$ , em °C: (TUCCI, 2007).

$$i = \left( \frac{t_i}{5} \right)^{1,514} \quad (6)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (7)$$

A Evapotranspiração Potencial (ETP), em mm, é dada por:

$$ETP = 16.Fc \left( \frac{10 * t_i}{I} \right)^a \quad (8)$$

Sendo:

Em que  $Fc$  é o comprimento médio dos dias do mês e  $a$  é calculado por:

$$a = 6,75.10^{-7}.I^3 - 7,71.10^{-5}.I^2 + 0,01791I + 0,492 \quad (9)$$

A eficácia da equação foi constatada através de diversos balanços hídricos climáticos, realizados em várias partes do mundo, comparando-se os excedentes hídricos calculados com dados de escoamento de bacias hidrográficas. O modelo de Thornthwaite funciona adequadamente em regiões de clima úmido, independentemente da latitude e da altitude (CAMARGO & CAMARGO, 2000 apud BARRETO, 2005).

Devido à inexistência de estação meteorológica na bacia do rio Urubici e consequentemente de dados de temperaturas médias mensais que serviriam de entrada nas equações 6 e 8 mostradas acima, foi utilizado um estudo realizado por técnicos da EPAGRI, onde foi estimado a evapotranspiração de referência mensal e anual para todo o estado de Santa Catarina em função das coordenadas geográficas: latitude, longitude e altitude. Para essa estimativa, foram utilizadas séries históricas de períodos não uniformizados, com no mínimo oito anos de registros (MASSIGNAM, A.M.;PANDOLFO, C, 2006).

Através de um ajuste da equação 6, para o número de dias do mês e para o comprimento do dia e utilizando o método de “Stepwise” (passo a passo), resultou a seguinte equação (MASSIGNAM, A.M.;PANDOLFO, C, 2006):

$$ET_o = a + b \times alt + c \times lon + d \times lat \quad (10)$$

Sendo:

ET<sub>o</sub> a evapotranspiração de referência;

alt a altitude em metros;

lon a longitude em graus e décimos positivos

a,b,c e d os parâmetros do modelo.

**Tabela 4** - Coeficiente de determinação parcial e total e valores dos coeficientes das equações de regressão da estimativa da evapotranspiração de referência mensal e anual em função da altitude, latitude e longitude no Estado de Santa Catarina.

Mês	Coeficientes das equações de regressão				r <sup>2</sup>
	Intercepto	Altitude	Latitude	Longitude	
Janeiro	7,57	-0,0360	-1,61	3,40	0,89
Fevereiro	66,32	-0,0306	-2,02	2,07	0,93
Março	123,89	-0,0287	-2,44	1,03	0,92
Abril	178,66	-0,0188	-2,52	-0,68	0,84
Maio	152,99	-0,0120	-1,49	-1,16	0,77
Junho	126,27	-0,0064	-1,22	-1,07	0,64
Julho	107,11	-0,0052	-1,69	-0,46	0,53
Agosto	78,41	-0,0056	-2,02	0,46	0,58
Setembro	40,45	-0,0085	-1,63	1,21	0,77
Outubro	43,75	-0,0147	-2,88	2,26	0,77
Novembro	19,15	-0,0210	-2,43	2,87	0,82
Dezembro	1,59	0,0303	-2,37	3,70	0,86
Anual	834,40	0,2255	-24,28	15,90	0,91

**Tabela 5** - Latitude, longitude e Altitude do município de Urubici.

Município	Latitude	Longitude	Altitude
Urubici	28,01	49,59	1186,4

Inserindo-se os coeficientes da tabela 4, as coordenadas geográficas e altitude da tabela 5 na equação 10, obtém-se as evapotranspirações potenciais médias anual e mensal para todo o município de Urubici.

#### **5.4.2.4. Infiltração**

Com os resultados das médias, mensais e anuais, obtidos das variáveis hidrológicas envolvidas no balanço hídrico, no método 1 e 2, foi possível estimar o volume total médio que infiltra na bacia mensalmente e anualmente, através da equação 4 mostrada no item 5.4.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Caracterização Fisiográfica

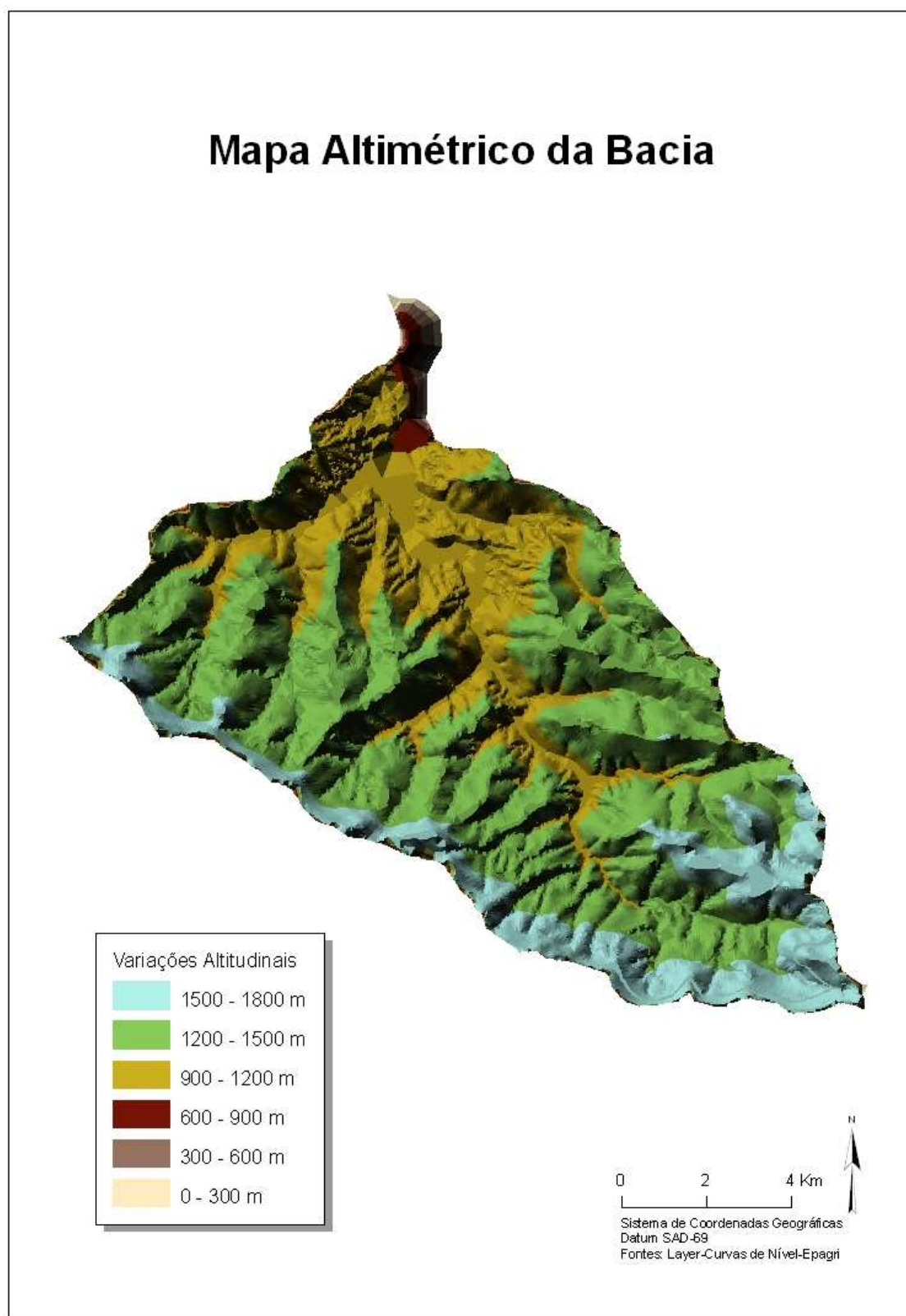
A tabela 6 apresenta um resumo dos valores encontrados na etapa de caracterização fisiográfica da bacia do rio Urubici.

**Tabela 6** – Resumo da Caracterização Fisiográfica

Área de Drenagem	Ad	127,44 Km <sup>2</sup>
Perímetro	P	56,20 Km
Coeficiente de Compacidade	Kc	1,39
Comprimento do Rio Principal	L	22,32 Km
Fator de Forma	Kf	0,26
Densidade de Drenagem	Dd	0,82 Km/Km <sup>2</sup>

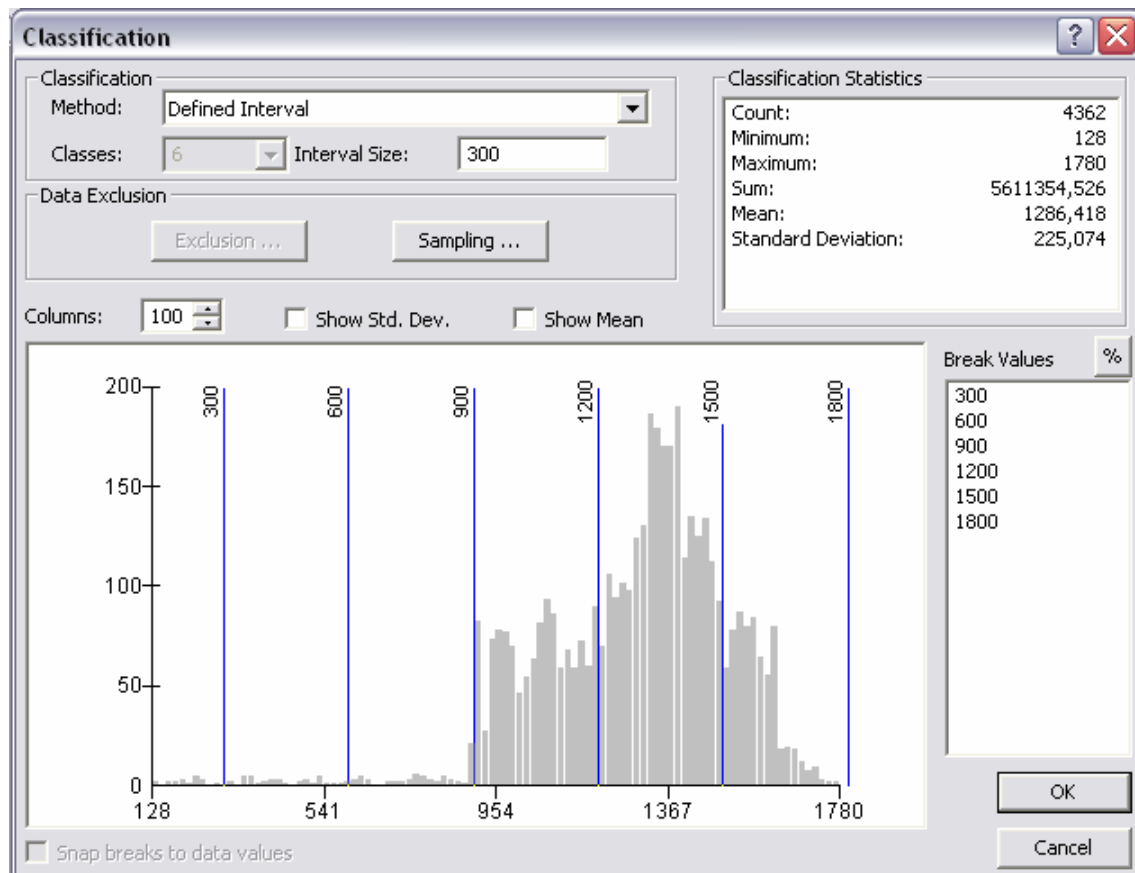
O mapa altimétrico da bacia (Fig.21) foi gerado com intervalos de altitude de 300m. Observa-se que as maiores altitude estão nas bordas ao sul da bacia, podendo atingir até 1800m. É possível também observar, que à medida que o rio Urubici vai descendo em direção a sua foz, há um alargamento de sua várzea, criando condições para a ocupação urbana.

### 6.1.3. Altimetria



**Figura 21** – Mapa Altimétrico da bacia do rio Urubici.

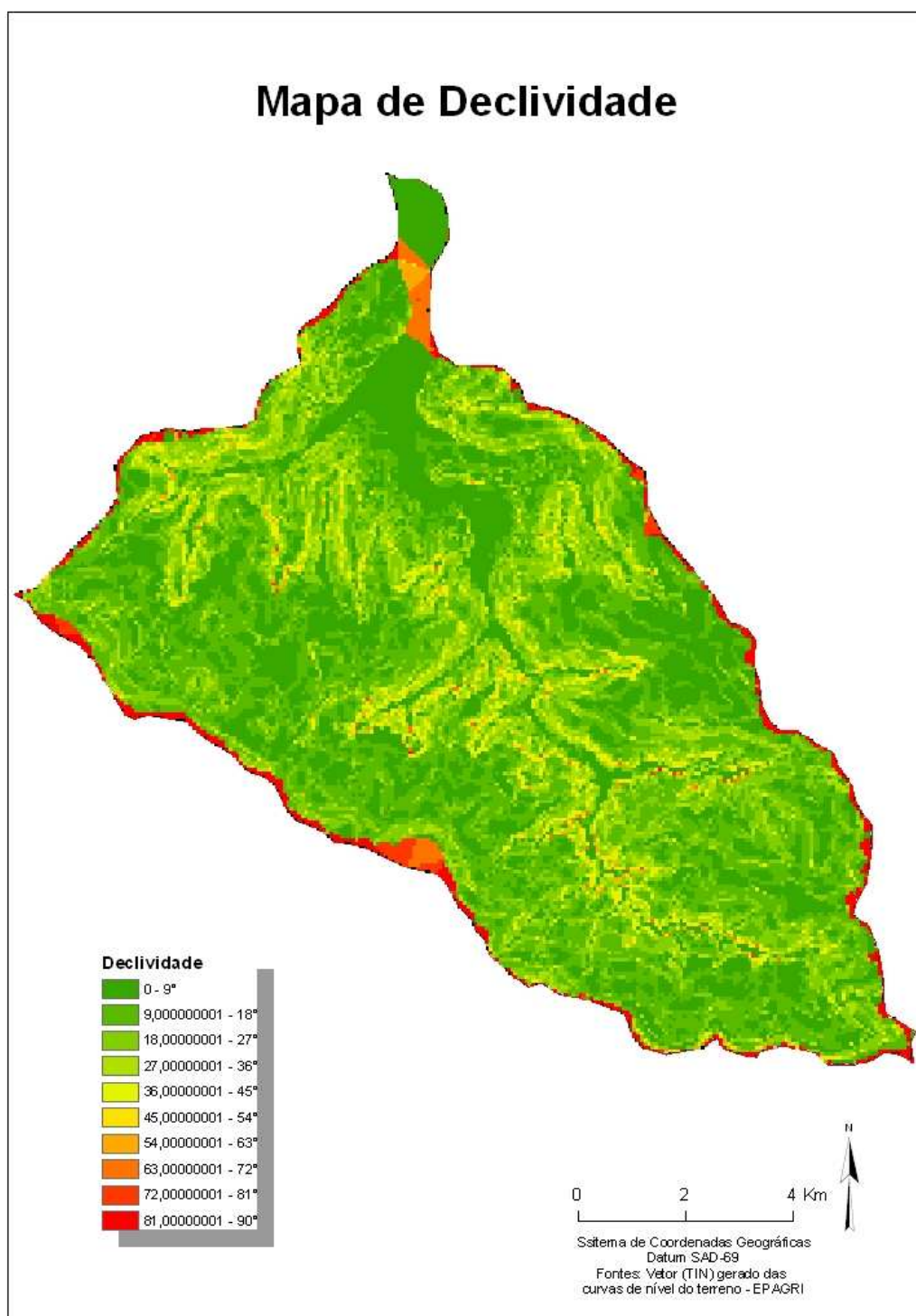
É possível também observar graficamente (Fig.22) a predominância de alguns intervalos de altitude, nota-se que a maior parte da bacia está concentrada no intervalo entre 1200 a 1500m.



**Figura 22** – Distribuição gráfica da predominância de alguns intervalos de altitude.

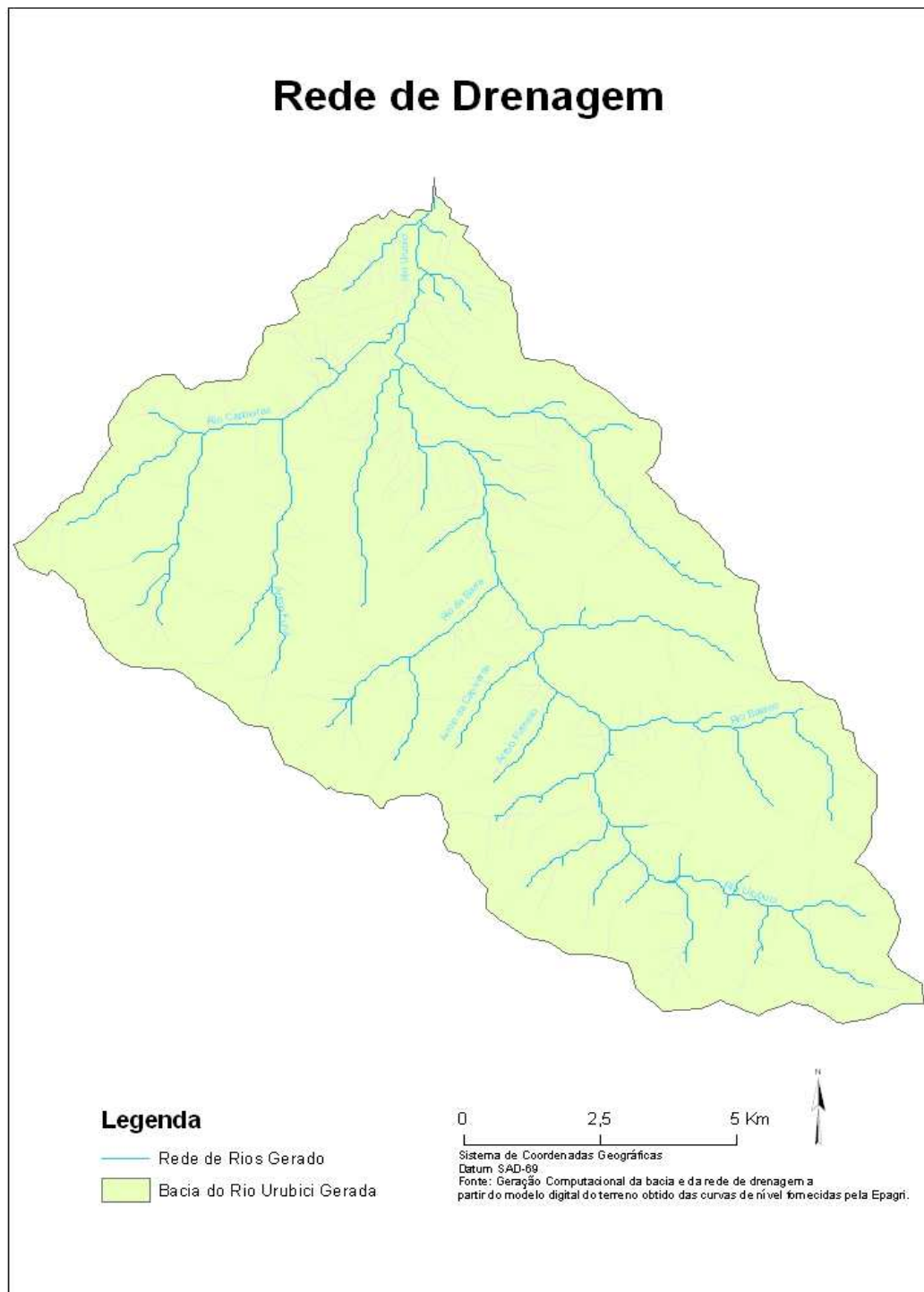


#### 6.1.4. Declividade



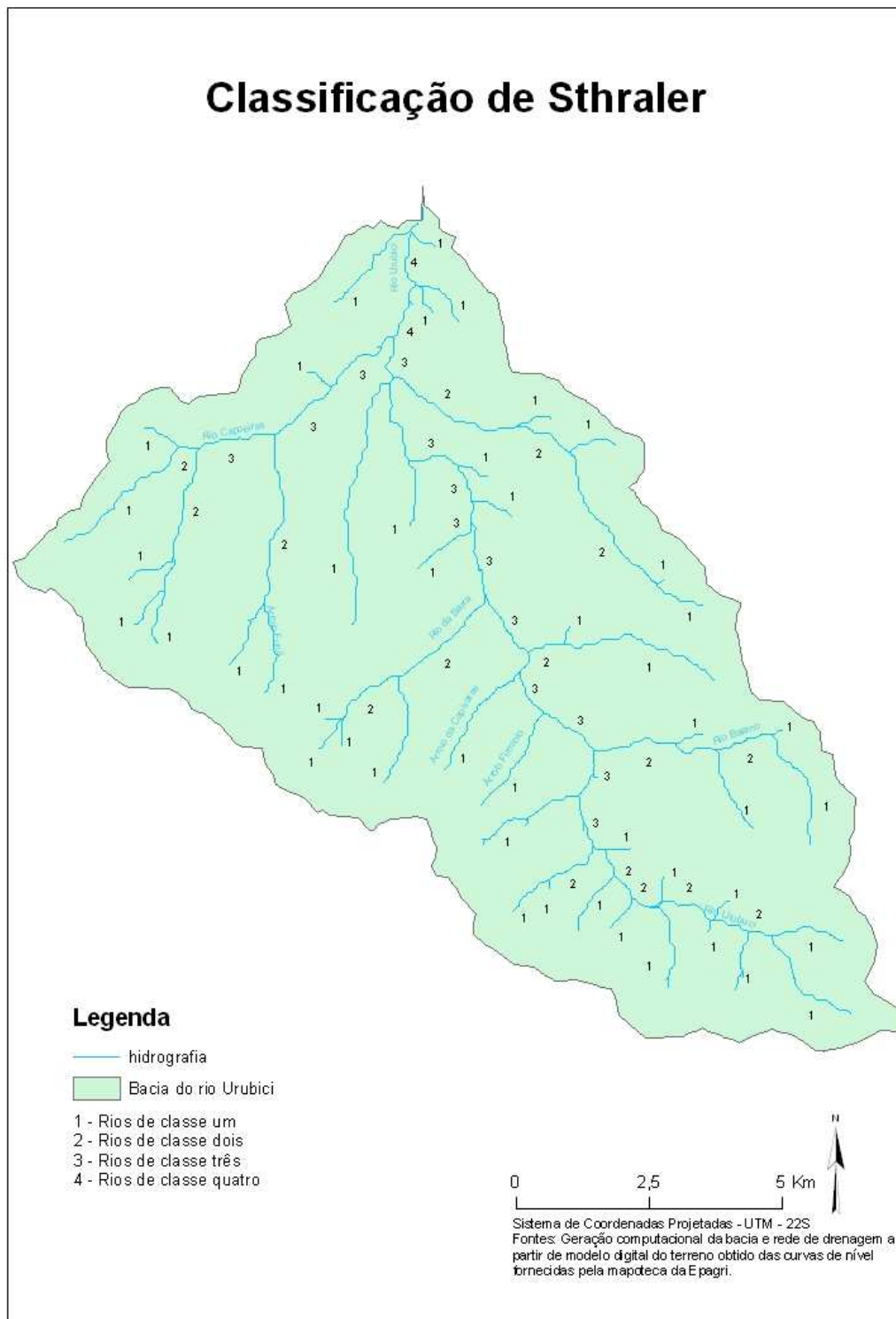
**Figura 23** – Ilustração da declividade da bacia.

### 6.1.5. Rede de drenagem



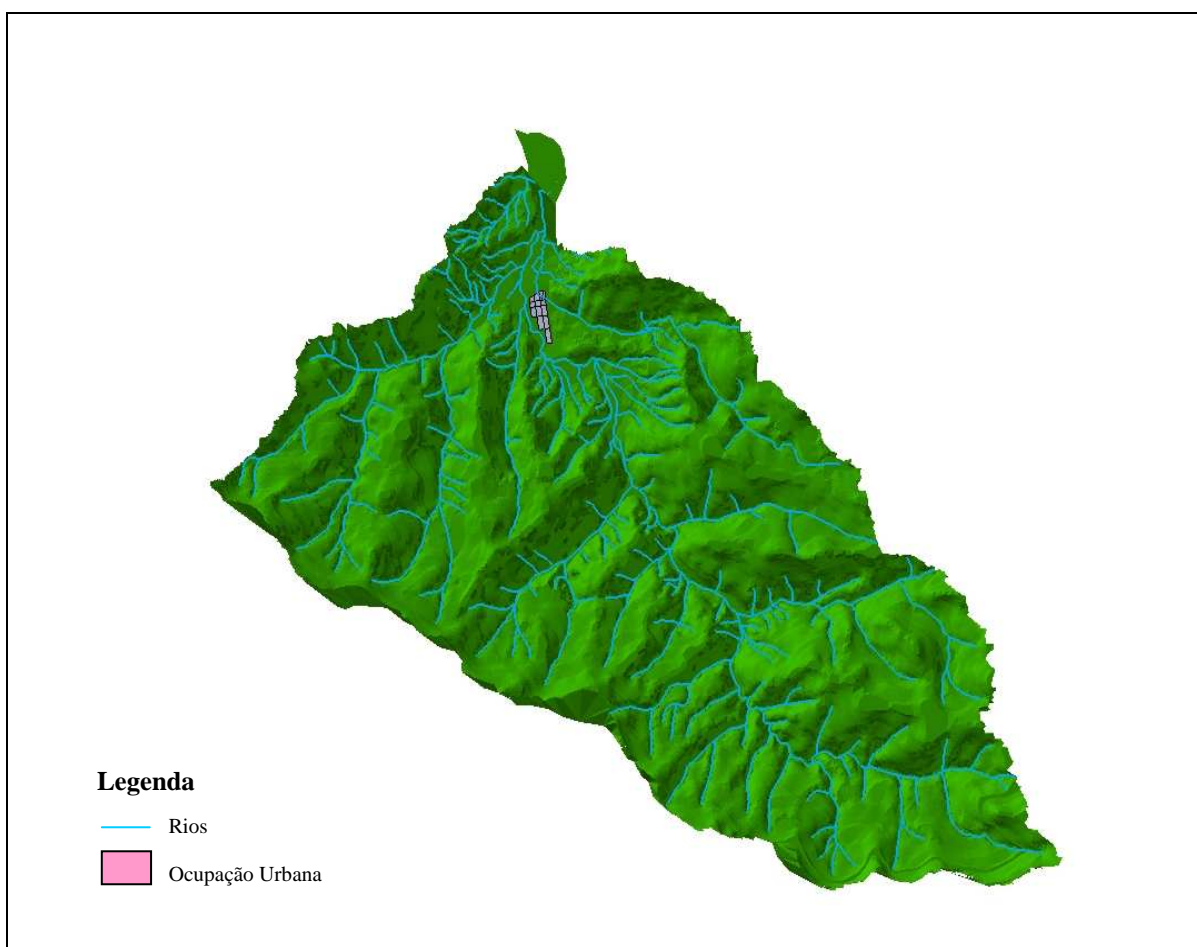
**Figura 24 – Rede de Drenagem Gerada**

### 6.1.6. Classificação dos rios segundo Strahler



**Figura 25** – Classificação dos rios segundo Strahler.

### 6.1.9. Representação da Bacia em 3D



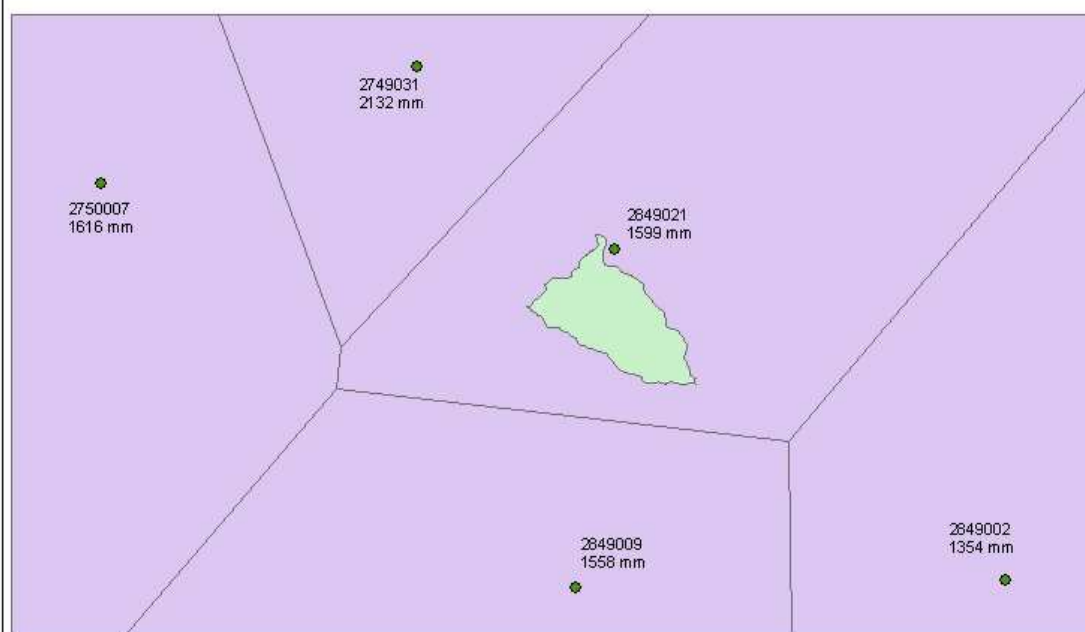
**Figura 26** – Visualização da bacia em 3D.

## 6.2. Quantificação das Variáveis do Balanço Hídrico

### 6.2.1. A Estimativa da Precipitação Média Anual e Mensal de Longo Período

Como o método 1, das isoietas estaduais, foi desenvolvido para uma escala estadual, ideal para bacias hidrográficas de médio e grande porte, então a bacia do rio Urubici ficou inserida entre isolinhas, fato que gerou como resultado um intervalo de valores, 1501 a 1599 mm de precipitação média anual. Já no método 2, dos polígonos de Thiessen (Fig 27) foi encontrado o valor médio anual de 1599 mm que está dentro do intervalo estimado pelo método 1. Esse valor estimado no método 2, poderia ter sido mais exato se houvesse uma densidade maior de postos pluviométricos nas área adjacentes da bacia.

## Polígonos de Thiessen



### Legenda

- Polígonos de Thiessen
- Bacia do Urubici

0 10 20 Km



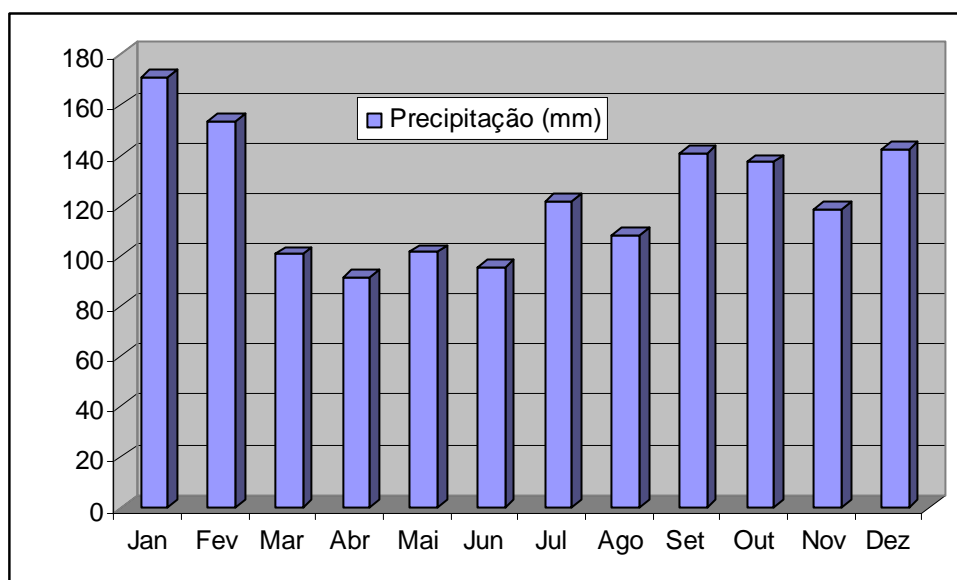
Sistema de Coordenadas Geográficas  
Datum SAD-69  
Fonte: Shapefile das Estações Pluviométricas - ANA,  
Shapefile da Bacia do Rio Urubici - EPAGRI

**Figura 27** - Polígonos de Thiessen, traçado pelos postos de monitoramento da região.

A tabela 7 resume os valores anuais encontrados nos métodos 1 e 2 e mensais pelo método 2.

**Tabela 7** - A Estimativa da Precipitação Média Anual e Mensal de Longo Período, pelos métodos 1 e 2.

Mês	Método - 1 (mm)	Método - 2 (mm)
Jan	-	171,01
Fev	-	153,54
Mar	-	100,92
Abr	-	91,66
Mai	-	101,68
Jun	-	95,45
Jul	-	121,7
Ago	-	108,23
Set	-	140,89
Out	-	137,42
Nov	-	118,83
Dez	-	142,55
<b>Anual</b>	1501-1599	1599



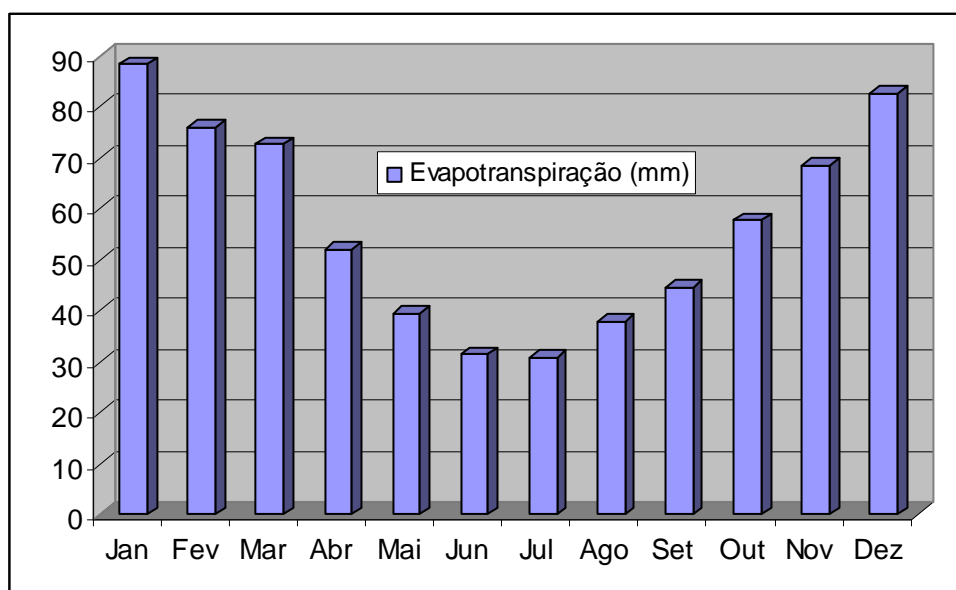
**Figura 28** – Precipitação Média mensal na Bacia.

### 6.2.2. A Estimativa da Evapotranspiração Média Anual de Longo Período

A intenção inicial era, assim como para as outras variáveis hidrológicas, realizar dois métodos de estimativa, o primeiro (Método 1) que fornecesse os valores das variáveis, anual, e o segundo (Método 2), os valores anual e mensal. Porém, em virtude da inexistência de séries históricas de temperatura do ar que serviriam de dados de entrada nas equações de Thornthwaite para a determinação da evapotranspiração média anual, então se utilizou do resultado encontrado no método 2 também no 1, como mostra a tabela 8.

**Tabela 8** - A Estimativa da Evapotranspiração Média Anual de Longo Período, pelos métodos 1 e 2.

Mês	Método - 1 (mm)	Método - 2 (mm)
Jan	-	88,4
Fev	-	76,1
Mar	-	72,6
Abr	-	52
Mai	-	39,5
Jun	-	31,4
Jul	-	30,8
Ago	-	38
Set	-	44,7
Out	-	57,7
Nov	-	68,5
Dez	-	82,7
<b>Anual</b>	675,3	675,3



**Figura 29** – Evapotranspiração média mensal na Bacia.

### 6.2.3. A Estimativa das Vazões Médias Anual e Mensal de Longo Período

Utilizando-se o intervalo de 1501 a 1599 mm e área de drenagem de 127,44 Km<sup>2</sup> como dados de entrada na equação 5, método 1, obteve-se o intervalo de 3,48 a 3,66 m<sup>3</sup>/s para a vazão média anual na bacia. Já no método 2 foi encontrado o valor de 3,56 m<sup>3</sup>/s que está dentro do intervalo estimado no método 1.

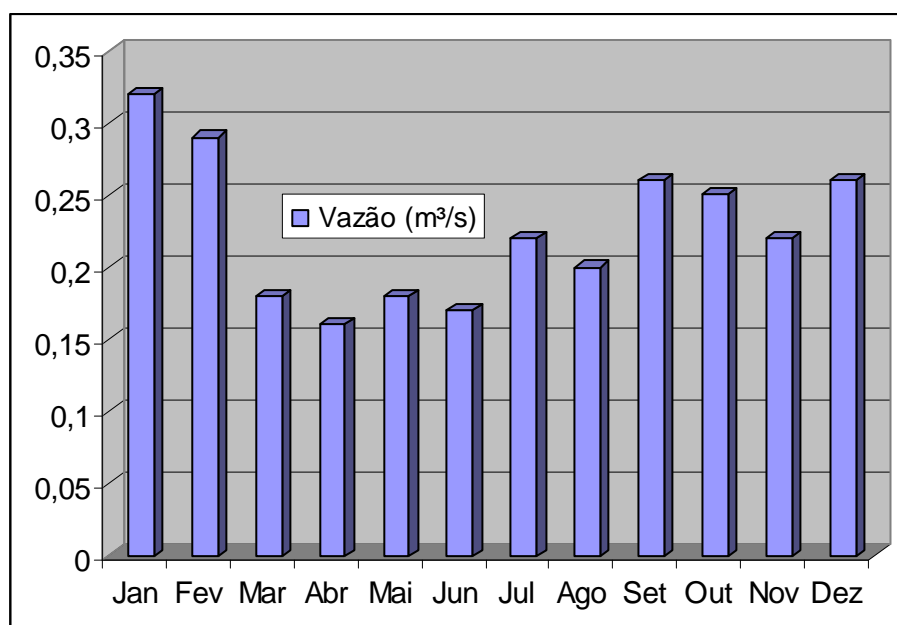
Os estudos de regionalização utilizados na estimativa das vazões para os dois casos, representaram uma boa alternativa à ausência de séries históricas ou à utilização de dados de outras bacias, pois são mais abrangentes, já que utilizam dados históricos de todos os postos fluviométricos que possuem dados representativos espacial e temporalmente. O estudo de regionalização utilizado no método 1 apresentou um valor maior do que no 2 para a mesma precipitação, porque ele renaturaliza as vazões, ou seja, ele não considera as derivações de água antes dos postos de medições.

A tabela 9 resume os valores encontrados nos dois métodos.



**Tabela 9** - A Estimativa das Vazões Médias Anual e Mensal de Longo Período, pelos métodos 1 e 2.

Mês	Método - 1 (m³/s)	Método - 2 (m³/s)
Jan	-	0,32
Fev	-	0,29
Mar	-	0,18
Abr	-	0,16
Mai	-	0,18
Jun	-	0,17
Jul	-	0,22
Ago	-	0,2
Set	-	0,26
Out	-	0,25
Nov	-	0,22
Dez	-	0,26
<b>Anual</b>	3,48 – 3,66	3,56



**Figura 30** – Vazão média mensal da Bacia.

### 6.3. Estimativa da Recarga Potencial Média, Anual e Mensal, na Bacia do Rio Urubici

O método 1 não exhibe apenas um valor de recarga potencial, mas um intervalo de valores de – 4,48 a 2,34 milhões de m<sup>3</sup> que não é conclusivo, não dá pra afirmar se a bacia está contribuindo positiva, para a recarga, ou negativamente, para a descarga do Aquífero Guarani. Já o método 2 fornece o valor de recarga anual de 5,56 milhões de m<sup>3</sup>, indicando que a bacia contribui positivamente para a recarga do aquífero e os valores mensais mostram que o mês de julho representa o período de maior recarga e que o mês de março o de maior descarga do aquífero.

Esses resultados mostram a importância do aquífero no abastecimento dos rios, mantendo-os perene mesmo em períodos de seca e também da bacia, para a recarga do aquífero e assim mantendo o equilíbrio entre eles.

A tabela 10 fornece um resumo dos valores anuais obtidos pelo método 1 e a tabela 11, os valores mensais e anual pelo método 2.

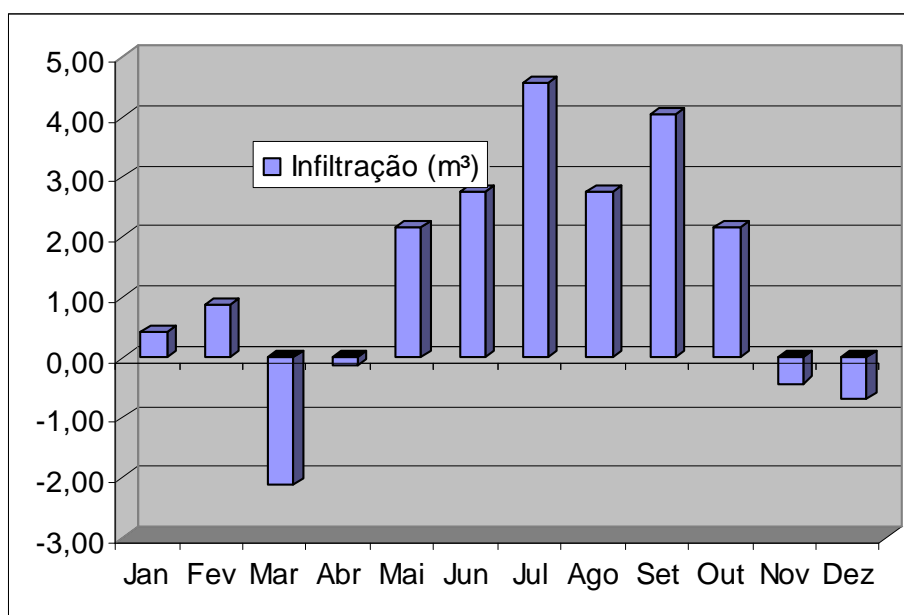
**Tabela 10** – Resumo dos volumes obtidos para as variáveis hidrológicas, pelo método 1

<b>Mês</b>	<b>Volume Precipitado (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Escoado (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Evapotranspirado (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Infiltrado (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>
<b>Anual</b>	(191,29 – 203,78)	(109,75 – 115,42)	(86,02)	(-4,48; 2,34)

**Tabela 11** – Resumo dos volumes obtidos para as variáveis hidrológicas, pelo método 2.

<b>Mês</b>	<b>Volume Precipitado (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Escoado (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Evapotranspirado (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume Infiltrado (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>
<b>Jan</b>	21,79	10,11	11,27	0,41
<b>Fev</b>	19,57	9,00	9,70	0,87
<b>Mar</b>	12,86	5,73	9,25	-2,12
<b>Abr</b>	11,68	5,17	6,63	-0,12
<b>Mai</b>	12,96	5,78	5,03	2,15
<b>Jun</b>	12,16	5,40	4,00	2,76
<b>Jul</b>	15,51	7,01	3,93	4,57
<b>Ago</b>	13,79	6,18	4,84	2,77
<b>Set</b>	17,95	8,21	5,70	4,04
<b>Out</b>	17,51	7,99	7,35	2,17
<b>Nov</b>	15,14	6,83	8,73	-0,42
<b>Dez</b>	18,17	8,31	10,54	-0,68
<b>Anual</b>	(203,78)	(112,20)	(86,02)	(5,56)

**Figura 31** – Recarga potencial mensal do Aquífero Guarani na bacia do rio Urubici



## 7. CONCLUSÃO

Os valores das infiltrações mensal e anual encontrados nesse trabalho pelo método 2, por serem positivos, maiores que zero, indicam que a bacia do rio Urubici é uma área de potencial recarga do Aquífero Guaraní. O mês de julho é o período no qual, em média, ocorreu a maior recarga potencial e março a maior descarga do aquífero.

As metodologias adotadas para a estimativa das recargas potenciais, mensais e anuais, apenas dão uma idéia da recarga real do aquífero, pois elas não consideram a interceptação da vegetação, as perdas por umedecimento do solo, fatos esses que tendem a superestimar os valores de recarga encontrados, porém o método da evapotranspiração de Thornthwaite fornece como saída da sua equação a evapotranspiração potencial que também superestima a real e como consequência fornecerá um valor subestimado de recarga na equação de balanço hídrico.

## 8. RECOMENDAÇÕES

Para que a recarga do aquífero se aproxime mais da real fazem-se as seguintes recomendações:

- Monitorar as variáveis hidrológicas no Município de Urubici, pelo menos duas estações fluviométricas de controle.
- Utilizar poços de monitoramento da variação do nível da água no aquífero.
- Criar um banco de dados para receber os dados monitorados.
- Estudar a interceptação da chuva na bacia para aproximar a recarga direta do aquífero do valor real.
- Modelar as bacias do município e utilizar os dados monitorados como entrada no modelo.
- Fazer uma caracterização geológica detalhada da bacia.
- Criar um mapa de uso do solo e espacializar a infiltração na bacia.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Divisão Hidrográfica Nacional**. 2003. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/>>. Acesso em 02 de setembro de 2007.

ARAÚJO, L. M., FRANÇA, A.B., POTTER, P.E. **Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná d Chaco–Paraná Basins, South América, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA**, Hydrogeology Journal, 1999. v.7, p. 317-336.

BARRETO, C. E. A. G. **Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**, 2006. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BORGUETTI, N. R. B.; BORGUETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. H. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba: Editora Maxigráfica, 2004. 132 p.

BRASIL. Governo do Estado de Santa Catarina. Secretaria de Desenvolvimento Sustentável, e Secretaria da Agricultura e Desenvolvimento Rural. **Estudos dos Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos para o Estado de Santa Catarina e apoio a sua implementação: Regionalização de Vazões das Bacias Hidrográficas Estaduais do Estado de Santa Catarina**, 2006. v.1, p.1-143.

CALLADO, R. **Utilização do Geoprocessamento para Determinação de Unidades Ecodinâmicas: Subsídios ao Planejamento Ambiental**. Florianópolis, 2003. 127 pp. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

COELHO NETO, A. L. **Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: Geomorfologia: uma atualização de Bases e conceitos**. (Org.) GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. Rio de Janeiro: Ed. Bertrandt Brasil, 1995. p.93-147.

DE VRIES, J. J. SIMMERS, I. **Groundwater recharge: an overview of process and challenges, USA**, Hydrogeology Journal, 2002. v. 10, p. 5-17.

EPAGRI. **Mapoteca Topográfica Digital de Santa Catarina**. 2007. Disponível em: <[http://www.ciram.epagri.rct-sc.br/ciram/comum/produtos/mapoteca\\_digital/index.jsp](http://www.ciram.epagri.rct-sc.br/ciram/comum/produtos/mapoteca_digital/index.jsp)> Acesso em: 15 de agosto de 2007.

FERREIRA, C. M. **Cenários de uso e outorga de água para a bacia hidrográfica do rio canoas: uma contribuição à gestão social da água.** Florianópolis, 2006. 163 pp. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

LISBOA, Henrique (Org.). **Notas de Aula em Hidrologia e Climatologia.** 1995.

MASSIGNAM, A.M.;PANDOLFO, C. **Estimativa da Evapotranspiração de Referência Mensal e Anual no Estado de Santa Catarina.** Florianópolis: Epagri, 2006. 24p (Epagri. Documentos, 225).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Populacional, 2007.** Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 28 de janeiro de 2008.

PARALTA, E. A.; OLIVEIRA, M. M.; LUBCZYNSKI, M. W., RIBEIRO, L. F. **Avaliação da recarga do sistema aquífero dos Gabros de Beja segundo critérios múltiplos: Disponibilidades hídricas e implicações agro-ambientais,** 2003 6º SILUSBA- Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos países de língua oficial portuguesa, Cabo Verde, Portugal, 2003.

POMPÊO, C. A. **Balanço Hídrico da Zona Não-Saturada do Solo na Bacia do Ribeirão da Onça (SP),** 1990. Tese de Doutorado. São Carlos, SHS-EESC-USP.

REBOUÇAS, A. C.; AMORE, L. **O Sistema Aquífero Guarani,** 2002. Revista Brasileira de Águas Subterrâneas. v. 16, Maio/2002, p. 135 – 143.

SANTOS, I. DOS; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B. BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada,** 2001. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento. ISBN 85-88519-01-1.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 4.ed, Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2007, p. 943.

UNESCO. **Proceedings of the International Conference on Regional aquifer systems in arid zones - Managing non-renewable resources,** Tripoli, Libya, 20–24 November 1999. Paris, Technical Documents in Hydrology No. 42.

UNIVERSIDADE DA ÁGUA. **Aquífero Guarani.** 2007. Disponível em: <<http://www.uniagua.org.br/>>. Acesso em 12 de setembro de 2007.

